

Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Lars Hendrik Simon

aus Helmstedt

eingereicht am 08.01.2014

mündliche Prüfung am 04.07.2014

1. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Meinhard Schilling
2. Referent: Dr.-Ing. Michael Beyer
3. Referent: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Erwin Peiner

Druckjahr: 2014

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Kurzfassung

In internationalen Normen zum Explosionsschutz ist Ultraschall als eine von 13 Zündquellenarten beschrieben. Darin werden für Anwendungen von Ultraschall in explosionsgefährdeten Bereichen strenge Anforderungen gestellt, die jedoch allein auf theoretischen Abschätzungen in Analogie zu anderen, besser erforschten Zündquellen basieren. Zudem existieren zu diesen Abschätzungen keine verlässlichen Aufzeichnungen oder Veröffentlichungen. Auch ist unklar, wie die Einhaltung des derzeit gültigen Grenzwert messtechnisch nachgewiesen werden kann.

Deshalb wird in der vorliegenden Dissertation die Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären umfassend untersucht. Dabei wurden im Rahmen von theoretischen Überlegungen Worst-Case Bedingungen für Ultraschall in flüssigen und gasförmigen Ausbreitungsmedien entwickelt, die eine Zündung provozieren könnten und in experimentelle Versuchsanordnungen umgesetzt. Zündversuche in diesen Anordnungen haben erstmals gezeigt, dass Ultraschall tatsächlich als Zündquelle wirksam werden kann, wenn die akustische Energie von einem stark schallabsorbierenden Zielkörper in Wärme umgewandelt wird.

Für Ultraschall in gasförmigen Medien konnten Schwefelstaub-Luft Gemische und Schwefelkohlenstoff-Luft Gemische gezündet werden. Als Worst-Case wurde dabei ein Ultraschallstehwellenfeld einer Frequenz von 20 kHz verwendet, wie es in der akustischen Levitationstechnik Anwendung findet. Unter dem Einfluss extremer Schalldruckpegel erwärmten sich Zielkörper aus porösen Festkörpern so stark, dass es zu einer Zündung an ihrer heißen Oberfläche kam.

In Flüssigkeiten konnte einerseits gezeigt werden, dass hoch fokussierter Ultraschall im MHz Bereich explosionsfähige Atmosphären aus Dampf-Luft Gemischen niedriger Zündtemperatur zünden kann. Als Zielkörper zur Transformation der akustischen Energie in Wärme wurde in diesem Fall ein temperaturbeständiger Kunststoff verwendet. Andererseits kann akustische Kavitation als Zündmechanismus ausgeschlossen werden.

Entsprechend der Untersuchungsergebnisse werden neue Anforderungen für den sicheren Betrieb von Ultraschallanwendungen in explosionsfähigen Atmosphären formuliert und diskutiert. In diesem Zusammenhang werden für Ultraschall in gasförmigen und flüssigen Medien jeweils neue Grenzwerte vorgeschlagen, die eine Anhebung gegenüber den derzeit gültigen um zwei Größenordnungen bei gleichem Sicherheitsniveau bedeuten.

Abstract

International safety regulations consider ultrasound to be an ignition source. Currently, applications of ultrasound in explosive atmospheres have to comply with harsh requirements which are based only on theoretical estimations in analogy to other ignition sources rather than experimental data. Moreover, there are no publications or significant records on these estimations.

Therefore, the research presented here gives a comprehensive assessment of the incendivity of ultrasound in explosive atmospheres. Hence, for airborne and liquid-borne ultrasound, worst-case conditions that provoke ignition were theoretically evolved and successively transformed into experimental setups. This way, it was possible to systematically investigate these worst-case situations and to show that ultrasound really can ignite explosive atmospheres if the acoustic energy is transformed into heat by a highly sound absorbing target.

For airborne ultrasound, ignition of sulfur dust-air mixtures and carbon disulphide-air mixtures was observed. A 20 kHz ultrasound standing wave field such as it is used for acoustic levitation was considered to be the worst case. Due to extreme sound pressure levels targets of porous materials heated up until ignition eventually was triggered by their hot surface.

In the case of liquid-borne ultrasound, on the one hand, it was shown that highly focused MHz ultrasound can cause ignition at liquid surfaces adjacent to explosive atmospheres of vapors with a low autoignition temperature. In this case, a target of highly temperature resistant plastic was used to transform acoustic energy into heat. On the other hand, acoustic cavitation is not capable of igniting explosive atmospheres.

On the basis of the results of the research it is now possible to revise the current regulations and to specify measures to safely operate ultrasonic applications in explosive atmospheres. In this context, requirements for the safe operation of ultrasonic applications in explosive atmospheres are presented and discussed. For airborne and liquid-borne ultrasound new threshold values are suggested that mean an augmentation by two orders of magnitude compared to the currently valid threshold while keeping the same level of safety.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.2	Methodisches Vorgehen	2
2	Grundlagen	3
2.1	Grundlagen zum Explosionsschutz	3
2.1.1	Voraussetzungen für die Zündung	3
2.1.2	Formen der Entzündung	5
2.1.3	Mögliche Zündmechanismen des Ultraschalls	7
2.2	Sicherheitstechnische Regelungen zu Ultraschallanlagen	9
2.3	Grundlagen zum Ultraschall	11
2.3.1	Grundlegende Schallfeldgrößen	11
2.3.2	Ausbreitung an Phasengrenzen	12
2.3.3	Dämpfung, Streuung und Absorption	15
2.3.4	Richtwirkung und Fokussierung	17
2.4	Anwendungen von Ultraschall	17
3	Zündwirksamkeit in Gasen, Dämpfen und Stäuben	19
3.1	Theoretische Betrachtungen	19
3.2	Versuchsanordnung	22
3.2.1	Voruntersuchungen im Ultraschallstehwellenfeld	22
3.2.2	Zündversuche: Versuchsanordnung und Durchführung	25
3.3	Ergebnisse	28
3.3.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen	28
3.3.2	Ergebnisse der Zündversuche	32
3.4	Diskussion der Zündwirksamkeit in Gasen, Dämpfen und Stäuben	39
3.5	Fazit zur Zündwirksamkeit in Gasen, Dämpfen und Stäuben	42
4	Zündwirksamkeit in Flüssigkeiten	43
4.1	Theoretische Überlegungen zur Worst-Case-Situation an der Flüssigkeitsoberfläche von Ultraschallbädern	43
4.2	Versuchsanordnung, Messtechnik und Durchführung der Zündversuche mit fokussiertem Ultraschall im MHz-Bereich	46
4.2.1	Versuchsanordnung	46
4.2.2	Auswahl des Zielkörpermateri als	47
4.2.3	Verwendete Messtechnik und Kalibrierung	49
4.2.4	Durchführung der Zündversuche	52
4.2.5	Kontrolluntersuchungen bei 20 kHz	54

4.3	Ergebnisse der Zündversuche mit fokussiertem Ultraschall . . .	54
4.4	Diskussion der Zündwirksamkeit in Flüssigkeiten bei fokus- siertem Ultraschall im MHz-Bereich	60
5	Untersuchungen bei Kavitation	62
5.1	Theoretische Untersuchungen	62
5.2	Versuchsanordnung zur Zündwirksamkeit von Kavitation . . .	64
5.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ka- vitation	67
5.4	Diskussion der Zündwirksamkeit in Flüssigkeiten bei Kaviati- on im kHz-Bereich	72
6	Sicherheitstechnische Anforderungen	76
6.1	Generelle Anforderungen	76
6.1.1	Darstellung der Anforderungen	76
6.1.2	Erläuterung	77
6.2	Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Gasen, Dämpfen und Stäuben	77
6.2.1	Darstellung der Anforderungen	77
6.2.2	Erläuterung	78
6.3	Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche	80
6.3.1	Darstellung der Anforderungen	80
6.3.2	Erläuterung	82
7	Bedeutung für die Praxis	86
8	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	89
A	Sicherheitstechnische Kenngrößen	96
A.1	Zündtemperatur	96
A.1.1	Definition	96
A.1.2	Sauerstoffanteil im explosionsfähigen Gemisch	96
A.1.3	Temperaturklassen	96
A.2	Mindestzündenergie	97
A.3	Normspaltweite bzw. flammendurchschlagssichere Spaltweite .	97
A.3.1	Definition	97
A.3.2	Explosionsgruppen	98
A.4	Untere Explosionsgrenze und obere Explosionsgrenze	99

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	VII
B Geräte Kategorien und Zoneneinteilung	99
C Liste der Kooperationspartner des Forschungsprojektes	100
D Verwendete Stäube	101
E Publikationsliste	102
F Lebenslauf	104

Abbildungsverzeichnis

1	Zündkriterien in Abhängigkeit von Expositionsfläche und -dauer	7
2	Worst-Case-Situation für Ultraschall in Gasen	22
3	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Erwärmung von Zielkörpern	23
4	Vibrometrische Darstellung des Schallfeldes der Sonotrode . .	24
5	Schlierenoptische Darstellung des Ultraschallstehwellenfeldes .	25
6	Hartmann-Rohr für Zündversuche	27
7	Reflektoreinheit	28
8	Einfluss des Zielkörpermaterials und des Sonotroden-Reflektor-Abstandes	29
9	Messung des Schalldruckpegels (SPL) und der Temperatur entlang der Schallfeldachse	31
10	Schalldruckpegel- und Temperaturmessung im Hartmann-Rohr	32
11	Zündversuche bei 180 dB und 181 dB	34
12	Zündversuche bei 179 dB	36
13	Zündversuche bei 178 dB	37
14	Zusammenfassung der Zündversuche	38
15	Gegenüberstellung der Zündversuche und Reproduzierbarkeitsuntersuchungen	39
16	Worst-Case-Situation an einer Flüssigkeitsoberfläche	46
17	Versuchsanordnung für Zündversuche an einer Flüssigkeitsoberfläche	47
18	Zielkörper der Vorversuche	48
19	Temperaturentwicklung in unterschiedlichen Zielkörpermaterialien	49
20	Leistungs- und Membranhydrophonmessung	51
21	Temperaturverlauf bei Zündung und Nichtzündung	56
22	Thermographische Darstellung der Temperaturentwicklung . .	57
23	Schlierenoptische Aufnahme eines Zündversuchs	58
24	Zusammenfassung der Zündversuche an der Flüssigkeitsoberfläche	59
25	Worst-Case-Szenario für akustische Kavitation	64
26	Versuchsanordnung für akustische Kavitation	65
27	Auswertung der Schalldruckmessung des Hydrophons	67
28	Einfluss der Überdeckung der Sonotrodenstirnfläche	68
29	Blaseneinleitung mittels Fritte	70
30	Blaseneinleitung mittels Kanüle	70
31	Kritische Stellen zur Schalldruckpegelbestimmung	79

32	Fallunterscheidung bezüglich der Schallquellenabmessung gegenüber der Wellenlänge	81
33	Additive Überlagerung von Quellen	81
34	Fehlende Überlagerung im Fernfeld	81

Tabellenverzeichnis

1	Anwendungen von Ultraschall	18
2	Temperaturklassen	96
3	Explosionsgruppen	98
4	Gerätekatégorien und Zonen	99
5	Verwendete Stäube	101

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

In den Normen und gesetzlichen Regelungen zum Explosionsschutz ist Ultraschall als eine von 13 Zündquellenarten beschrieben. Darin ist für Ultraschallanwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen ein Grenzwert von 1 mW/mm^2 festgesetzt [1, 2]. Dieser Grenzwert beruht jedoch auf theoretischen Abschätzungen in Analogie zu anderen, besser erforschten Zündquellen. Dabei ist davon auszugehen, dass der Grenzwert konservativ ausgelegt wurde und einen großen Sicherheitsabstand beinhaltet.

Die Anforderungen zur Risikominderung in diesen Normen und Regelungen unterscheiden zudem nicht zwischen Ultraschallanwendungen in Flüssigkeiten oder in Gasen, Dämpfen oder Stäuben und geben keine Hinweise zum Nachweis der Einhaltung des Grenzwertes. Dies ist problematisch, da sich Ultraschall in Gasen und Flüssigkeiten zwar nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ausbreitet, aber dennoch Unterschiede bzgl. der Zündgefahr bestehen. So wird der Ultraschall im einen Fall direkt in die explosionsfähige Atmosphäre eingekoppelt. Im zweiten Fall muss er erst die Phasengrenze flüssig-gasförmig überwinden. Auf Grund der deutlich verschiedenen Wellenlängen ist z. B. auch die Fokussierbarkeit sehr unterschiedlich. Zudem regt Ultraschall in Flüssigkeiten akustische Kavitation an, bei der hohe Energiedichten auftreten. Dennoch wird dieser Aspekt im derzeit gültigen Regelwerk nicht berücksichtigt.

In Bezug auf die bei Ultraschallanwendungen in Flüssigkeiten verwendeten Leistungsdichten ist der Grenzwert niedrig, sodass der Einsatz von brennbaren Flüssigkeiten, z. B. in der Reinigungstechnik, nicht zulässig ist, wenn keine Maßnahmen zur Vermeidung einer Zündung ergriffen werden. Der strikten Regulierung steht gegenüber, dass bisher keine durch Ultraschall verursachten Explosionsunfälle bekannt sind. Im Rahmen der Forschung zur vorliegenden Arbeit wurden dazu die Projektpartner, Sachversicherer, die Gewerbeaufsicht, die Gesellschaft für angewandte Ultraschallforschung e.V., sowie Experten im In- und Ausland befragt. Zudem gibt es keine aussagekräftigen Aufzeichnungen oder Veröffentlichungen darüber, wie der derzeit gültige Grenzwert abgeschätzt wurde. Für die Untersuchungen konnte deshalb auf keine Erfahrungen oder Literaturquellen zu Zündungen durch Ultraschall zurückgegriffen werden.

Das Ungleichgewicht zwischen regulativen Anforderungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Zündquelle Ultraschall führt erstens wegen des vermutlich großen Sicherheitsabstandes des Grenzwertes zu einem Hemmnis für innovative Anwendungen und zweitens auch zu seiner Missachtung. Dies zeigt den Handlungsbedarf zur gezielten Untersuchung dieser Zündquelle. Vor diesem Hintergrund wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ein Forschungsprojekt zur Zündwirksamkeit von Ultraschall durchgeführt, dessen Ergebnisse in der vorliegenden Dissertation vorgestellt werden. Dieses Forschungsprojekt wurde in Zusammenarbeit der Fachbereiche Schall und Zündquellensicherheit durchgeführt. Unterstützt wurde es zudem von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Berufsgenossenschaften und Herstellerfirmen von Ultraschall- und Reinigungsanlagen.

1.2 Methodisches Vorgehen

Für die Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall lassen sich folgende zentrale Fragestellungen in explosionsfähigen Atmosphären formulieren:

1. Kann Ultraschall überhaupt als Zündquelle wirksam werden?
2. Welche Bedingungen müssen für das Wirksamwerden erfüllt sein?
3. Wie passen diese Bedingungen zu den derzeit gültigen Bestimmungen?
4. Lässt sich der Grenzwert auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse ausweiten und präzisieren?

Um diese Fragestellungen zu beantworten wurde nach folgender Methodik vorgegangen: Im ersten Schritt wurden im Rahmen theoretischer Vorüberlegungen Worst-Case-Bedingungen für Ultraschall in Flüssigkeiten, sowie in Gasen, Dämpfen und Stäuben erarbeitet, d. h. Bedingungen, die eine Zündung provozieren könnten.

Im zweiten Schritt wurden jeweils diese Worst-Case-Bedingungen in einem Versuchsaufbau nachgebildet, in dem im dritten Schritt experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

Der vierte Schritt bestand in der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Vorüberlegungen und Untersuchungen, sodass sich letztlich, im fünften Schritt, sicherheitstechnische Schlussfolgerungen ziehen ließen, die eine Neubewertung der Zündquelle Ultraschall ermöglichen.

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen zum Explosionsschutz

2.1.1 Voraussetzungen für die Zündung

Voraussetzungen für eine Explosion sind das zeitliche und räumliche Zusammenfallen von wirksamer Zündquelle, einem Brennstoff, z. B. in Form eines Dampfes, Gases oder fein verteilten Staubs und einem Oxidationsmittel, z. B. Sauerstoff bzw. Luft-Sauerstoff. Maßnahmen zur Vermeidung oder zum Schutz gegen Explosionen sind deshalb entsprechend der Richtlinie 94/9/EG ([3]) in den primären Explosionsschutz, der die Vermeidung der explosionsfähigen Atmosphäre betrifft, den sekundären Explosionsschutz, der die Verhinderung des Wirksamwerdens einer Zündquelle zum Ziel hat, oder letztlich den tertiären Explosionsschutz, der die Eindämmung der Folgen einer nicht zu vermeidenden Explosion adressiert, unterteilt.

In der DIN EN 1127-1:2011 [1] werden 13 Zündquellen genannt. Zu ihnen zählen z. B. heiße Oberflächen, mechanisch erzeugte Funken, elektromagnetische Strahlung und auch Ultraschall. Kommen eine explosionsfähige Atmosphäre und eine der Zündquellen zusammen, stellt sich die Frage, ob die Zündquelle auch wirksam werden kann, d. h. ob die Zündquelle stark genug ist, um eine explosionsfähige Atmosphäre zu zünden. Dies hängt vom vorliegenden Gemisch ab. Aus diesem Grund wurden für Gase und Dämpfe sicherheitstechnische Kenngrößen entwickelt, mit denen sich die von ihnen ausgehende Gefahr einschätzen lässt. Dabei befasst sich ein Teil der Kenngrößen mit dem primären Explosionsschutz und gibt Aufschluss darüber, ob überhaupt eine explosionsfähige Atmosphäre vorliegt (z. B. Explosionsgrenzen, Flammpunkt, Sauerstoffgrenzkonzentration). Der zweite Teil richtet sich an den sekundären Explosionsschutz und spiegelt wider, wie stark eine Zündquelle sein muss, um ein Brennstoff-Luft-Gemisch zünden zu können (Zündtemperatur und Mindestzündenergie). Schließlich bezieht sich der dritte Teil der Kenngrößen auf den tertiären Explosionsschutz und liefert Aussagen über die Auswirkung einer gezündeten Explosion (Explosionsdruck, Druckanstieg, Normspaltweite). Die sicherheitstechnischen Kenngrößen sind im Anhang im einzelnen definiert. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die Kenngrößen zur Beschreibung der explosionsfähigen Atmosphäre und der Ausprägung der Zündquelle wichtig. Die Normspaltweite gibt zudem einen Anhaltspunkt darüber, wie groß das von der Zündquelle erwärmte Volumen sein muss, damit es zu einer Explosion kommen kann [4].

Bei der Verwendung der sicherheitstechnischen Kenngrößen ist allgemein zu berücksichtigen, dass sie nach genormten Bestimmungsverfahren ermittelt werden. Dabei hängt die ermittelte Kenngröße von der Messanordnung ab, sodass diese Größen nicht absolut zu begreifen sind. So wird z. B. die tatsächlich für eine Zündung erforderte Zündtemperatur in einer willkürlichen Anordnung von den Umgebungsbedingungen, z. B. der Größe der heißen Fläche, von der Dauer des Zusammentreffens von explosionsfähiger Atmosphäre (dabei spielen auch Strömungsgeschwindigkeiten eine Rolle) sowie der Brennstoffkonzentration, beeinflusst. Deshalb kann sie erheblich von der genormten Zündtemperatur abweichen, allerdings nur zur sicheren Seite.

Trotz dieses Umstandes lassen sich Gase und Dämpfe anhand dieser Kenngrößen hinsichtlich ihrer Gefährdung ordnen. Dabei ist für diese Arbeit die Ordnung von Gasen und Dämpfen hinsichtlich ihrer Normzündtemperatur in Temperaturklassen sowie hinsichtlich ihrer Normspaltweite in Explosionsgruppen wichtig. Die Temperaturklasse gibt dabei Aufschluss darüber, welche Oberflächentemperatur von einem Gerät nicht überschritten werden darf. Vor dem Hintergrund der Untersuchung der Zündwirksamkeit von Ultraschall hat diese Klassifizierung den Vorteil, dass die von Ultraschall ausgehende Gefahr durch eine thermische Zündung anhand von repräsentativen Vertretern der Temperaturklassen erfolgen kann. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen für Gase und Dämpfe können aus Tabellenwerken (z. B. BRANDES&MÖLLER [5]) entnommen werden. Die sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben hängen von der Beschaffenheit der Stäube ab. In Tabellenwerken zu diesen Kenngrößen (z. B. GESTIS-STAU-EX-Datenbank der DGUV) sind Stäube über eine Kennnummer und die Korngrößenverteilung charakterisiert.

2.1.2 Formen der Entzündung

Allen Zündprozessen ist gemein, dass die Zündquelle ein bestimmtes Volumen an zündfähigem Gemisch auf eine ausreichend hohe Temperatur erwärmen muss, sodass es zu einer chemischen Reaktion kommt, bei der chemische Energie aus dem Brennstoff-Gemisch freigesetzt wird. Übersteigt diese Energiefreisetzung die Verluste aus Wärmeleitung, Wärmediffusion und Wärmestrahlung setzt sich die exotherme Reaktion immer schneller fort, was schließlich in der Explosion mündet [6–10].

Kettenexplosion und thermische Explosion

Der Anstoß des Prozesses kann dabei in die zwei Grenzfälle der Kettenexplosion und der thermischen Explosion [8] unterschieden werden, die in der Realität jedoch meist als Mischformen auftreten. Bei der Kettenexplosion bewirkt die Zündquelle einen Radikalkettenmechanismus. Der Kettenstart dieses Mechanismus kann z. B. photochemisch [10], durch Teilentladungen [9] oder durch im Vergleich zur thermischen Explosion niedrige Temperaturen ausgelöst werden. Da sich jedoch in diesem Fall erst ein ausreichender Radikalpool bilden muss, erfordert dieser Mechanismus eine temperaturabhängige Zündverzugszeit, die eine Größenordnung von Mikrosekunden bis Sekunden haben kann [6, 9–11]. Die Radikalbildung führt zu weiteren Kettenverzweigungen, bei denen immer neue Radikale entstehen, was zu einer sich selbst verstärkenden Wärmeproduktion und schließlich zur Zündung führt. Der Zündmechanismus kommt zum Erlöschen, wenn durch Kühlung, z. B. an Gefäßwänden, oder durch Entzug der Radikale der sich selbst verstärkende Effekt verhindert wird [4].

Bei der thermischen Explosion wird das ganze Gemisch oder ein Teil von ihm kurzzeitig oder kontinuierlich erwärmt, sodass sich ein Prozess exothermer Reaktionen in Gang setzt. Dabei ist vor allem die exponentielle Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur gegenüber der linearen Temperaturabhängigkeit der Verluste bestimmt [6, 8]. Im Gegensatz zur Kettenexplosion erfolgt die Zündung dabei ohne Zündverzugszeit [6].

Selbstzündung und Fremdzündung

Zu unterscheiden sind zudem die Selbstzündung und die Fremdzündung. Im Fall der Selbstzündung entscheidet die Kombinationen aus Druck und Temperatur und Brennstoffkonzentration eines zündfähigen Gemisches darüber, ob es zu einer explosionsartigen oder einer langsamen Reaktion kommt. Bei atmosphärischen Verhältnissen wird das Eintreten der Zündung demzufolge von der Temperatur bestimmt, sodass die maßgebliche sicherheitstechnische Kenngröße die Normzündtemperatur ist. Dieser Zündprozess betrifft insbesondere thermische Zündungen, bei gleichmäßiger Erwärmung des Brennstoff-Luft-Volumens. Für Drücke über 100 kPa können tendenziell schon geringere Temperaturen bei sonst gleichen Umständen zur Zündung führen, da die Reaktionsgeschwindigkeit proportional mit dem Druck zunimmt [6, 10].

Führt die Druck-Temperatur-Kombination eines Brennstoff-Luft-Gemisches innerhalb seiner Zündgrenzen nicht zur Selbstzündung, kann es dennoch durch eine lokal wirkende Zündquelle zur Explosion gebracht werden. In diesem Fall spricht man von einer Fremdzündung. Die Zündquelle erwärmt dabei ein kleines Volumen des Gemisches so stark, dass es sich selbst entzündet und die von dort ausgehende Flammenfront das umgebende Gemisch. In diesem Fall muss die lokal wirkende Zündquelle genügend Energie zur Erwärmung eines kritischen Volumens bereitstellen, sodass die maßgebliche sicherheitstechnische Kenngröße die Mindestzündenergie ist [6].

In Abhängigkeit von der Größe des erwärmten Volumens und der Einwirkdauer der Zündquelle lassen sich Tendenzen für Kriterien in Bezug auf die Zündwirksamkeit einer Zündquelle erkennen. Dies ist in Abbildung 1 skizziert.

Für den Fall eines großflächig und dauerhaft erwärmten Volumens ist entscheidend, dass die Leistungsdichte der Zündquelle so groß ist, dass die Temperatur der erwärmten Oberfläche die Zündtemperatur des zündfähigen Gemisches überschreitet. Wird die Kontaktfläche zum Gemisch verkleinert, verschlechtert sich das Verhältnis zwischen Wärmeproduktion und Wärmeverlusten. Bei genügend hoher Wärmeleistung kann es dennoch zu einer Zündung kommen. Ist auf der anderen Seite die Einwirkdauer der Zündquelle kurz, ist entscheidend, dass in dieser Zeit genügend Energie in das Gemisch eingekoppelt wird.

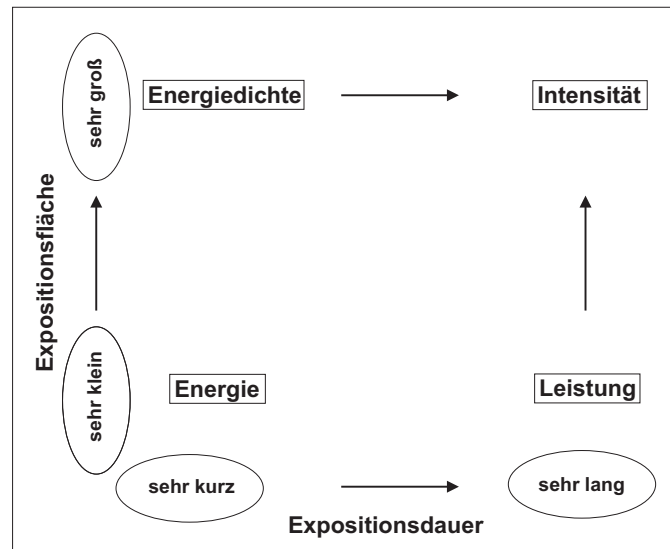


Abbildung 1: Kriterium für das Wirksamwerden der Zündquelle in Abhängigkeit von Expositionsfläche und Expositionsdauer

2.1.3 Mögliche Zündmechanismen des Ultraschalls

Ultraschall kann in gasförmige, flüssige und feste Medien eingekoppelt werden. Ultraschallanlagen sind dabei meist in elektrische Betriebsmittel integriert. Somit kann es an Ultraschallanlagen auch zu Zündungen durch elektrische Zündquellen kommen (z. B. elektrostatische Entladungen, elektrische Ausgleichsströme). Außerdem kann es in den Ultraschallanlagen durch mechanische Spannungen und Reibung in den zur Schallerzeugung und Schallabstrahlung benötigten Komponenten sowie in den mit ihnen verbundenen Anlagenteilen zu Fehlerzuständen wie Rissen kommen, sodass sich mechanische Zündquellen ausbilden können. Für beide Fälle gibt es jedoch klare Anforderungen und Normen, sodass sie in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Gegenstand der Betrachtungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall sind deshalb ausschließlich die in gasförmige und flüssige Medien abgestrahlten Ultraschallfelder.

Gemäß dieser Abgrenzung gibt es folgende Zündmechanismen:

- A. Bei der direkten Einkopplung der Ultraschallwelle in explosionsfähige Atmosphären (Gasgemische, Dämpfe, Nebel, Stäube):
 - 1. Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch direkte Absorption der Schallwelle;
 - 2. Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch einen im Ultraschallfeld erwärmten Festkörper;
- B. bei Einkopplung des Ultraschalls in (brennbare) Flüssigkeiten, die an explosionsfähige Atmosphären angrenzen:
 - 3. Durchdringen der Flüssigkeitsoberfläche und Zündung eines explosionsfähigen Brennstoff-Luft-Gemisches oberhalb der Flüssigkeit;
 - 4. Absorption durch ein die Flüssigkeitsoberfläche durchdringenden Absorber;
 - 5. Dampfblasenexplosion unter der Flüssigkeitsoberfläche durch akustische Kavitation, die in eine explosionsfähige Atmosphäre oberhalb des Flüssigkeitsspiegels durchschlägt.

Diese Unterteilung erfolgt in enger Anlehnung an die DIN EN 60079-28 „Explosionsfähige Atmosphären – Teil 28: Schutz von Einrichtungen und Übertragungssystemen, die mit optischer Strahlung arbeiten“[12].

2.2 Sicherheitstechnische Regelungen zu Ultraschallanlagen

Die Richtlinie 94/9/EG ([3]) schreibt für die Konstruktion von Geräten, die in explosionsgefährdeten Bereichen betrieben werden, vor, dass Maßnahmen zur Vermeidung und dem Schutz vor Explosionen getroffen werden müssen. Dies umfasst die bestimmungsgemäße Verwendung, mögliche Fehlerzustände, vorhersehbaren Fehlgebrauch sowie Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten. Geräte sind deshalb hinsichtlich ihres Schutzniveaus in drei Kategorien eingeteilt. Die Kategorie 1 weist das höchste Schutzniveau auch bei seltenen Fehlerzuständen auf, wohingegen in Kategorie 3 Zündquellen nur im Normalbetrieb vermieden werden. Entsprechend dieses Schutzniveaus dürfen Geräte gemäß der Richtlinie 1999/2/EG ([13]) in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, die in drei Zonen eingeteilt sind. In Zone 0 (Zone 20 bei Stäuben) tritt ständig und dauerhaft explosionsfähige Atmosphäre auf, in Zone 2 (Zone 22 bei Stäuben) dagegen nur selten und kurzzeitig. Tabelle 4 im Anhang stellt die Gerätekategorien den jeweiligen Zonen entsprechend der EX-RL gegenüber. Aus dieser Einteilung sind in der DIN EN 1127-1:2011 [1] folgende Anforderungen festgesetzt:

„Werden Gefährdungen durch Ultraschall festgestellt, dann müssen in Abhängigkeit von der Kategorie die Geräte, Schutzsysteme und Komponenten folgende Anforderungen erfüllen:

Anforderungen in Gasen und Dämpfen

Alle Kategorien:

Ultraschallwellen mit einer Frequenz über 10 MHz sind unzulässig, es sei denn, es wird nachgewiesen, dass im gegebenen Fall keine Zündgefahr besteht, weil keine Absorption durch Molekularresonanz auftritt. Die Angaben in diesem Unterabschnitt beziehen sich allein auf die durch die Schalleistung bewirkte Zündgefahr. Für die dazugehörenden elektrischen Anlagen ist Abschnitt 6.4.5 zu berücksichtigen.

Für Ultraschallwellen einer Frequenz bis 10 MHz gelten folgende Anforderungen:

Alle Kategorien:

Ultraschallwellen sind nur dann zulässig, wenn die Sicherheit des Arbeitsverfahrens sichergestellt ist. Die Leistungsdichte des erzeugten Schallfeldes darf 1 mW/mm^2 nicht überschreiten, es sei denn, es wird nachgewiesen, dass im gegebenen Fall keine Entzündung möglich ist.

Kategorien 2 und 3:

Bei Arbeitsverfahren mit üblichen Ultraschallgeräten (z. B. Ultraschallechoprüfgeräte) sind besondere Schutzmaßnahmen gegen Zündgefahren durch die Ultraschallwellen selbst erforderlich, wenn die Leistungsdichte im erzeugten Schallfeld 1 mW/mm^2 überschreitet, es sei denn, es wird nachgewiesen, dass im gegebenen Fall keine Entzündung möglich ist“ [1].

Anforderungen in Staub-Luft-Gemischen

Für den Einsatz in Staub-Luft Gemischen gelten derzeit folgende Regelungen:

„Bei Ultraschallgeräten darf der Leistungspegel im Strahlungsfeld eine Leistungsdichte von $0,1 \text{ W/cm}^2$ und eine Frequenz von 10 MHz für Dauerschallquellen und 2 mJ/cm^2 für Impulsschallquellen nicht überschreiten. Die mittlere Leistungsdichte darf $0,1 \text{ W/cm}^2$ nicht überschreiten.

Zone 20 und Zone 21:

In Zone 20 und Zone 21 dürfen Ultraschallquellen eine Leistungsdichte im Strahlungsfeld von $0,1 \text{ W/cm}^2$ und eine Frequenz von 10 MHz für Dauerschallquellen und 2 mJ/cm^2 für Impulsschallquellen nicht überschreiten. Die mittlere Leistungsdichte darf $0,1 \text{ W/cm}^2$ nicht überschreiten.

Zone 22:

Für die Zone 22 sind keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen gegen Zündgefahren durch Ultraschallgeräte selbst erforderlich, wenn die Leistungsdichte im erzeugten Strahlungsfeld von $0,1 \text{ W/cm}^2$ und eine Frequenz von 10 MHz nicht überschritten wird“ [14].

2.3 Grundlagen zum Ultraschall

2.3.1 Grundlegende Schallfeldgrößen

Ultraschall ist eine akustische Welle, mit einer unteren Grenzfrequenz von 20 kHz [15–17] und liegt damit oberhalb des Hörbereichs des menschlichen Gehörs. In diesem Abschnitt soll auf Kenngrößen und grundlegende Zusammenhänge der Akustik eingegangen werden, die für das Verständnis der Arbeit wichtig sind. Für Hintergründe zu diesen Kenngrößen und Effekten sei jeweils auf die Grundlagenliteratur zum Ultraschall bzw. zur Akustik verwiesen (z. B. [15–19]). In dieser Arbeit werden Frequenzen bis 10 MHz untersucht.

Die Schallwelle ist eine mechanische Welle aus Kompressionen und Dekompressionen des Ausbreitungsmediums. Die Art und Weise der Ausbreitung einer Schallwelle ist von dem Medium abhängig, das sie durchläuft. Das Medium sei als homogen, isotrop und kompressibel angenommen [15, 17]. Der einem Ort x und zu einem Zeitpunkt t zugeordnete Schalldruck $p(x, t)$ einer harmonischen ebenen Schallwelle lässt sich als komplexe Größe schreiben

$$p(x, t) = \hat{p} \cdot e^{-(\alpha + jk)x} \cdot e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$p(x, t) = p_k(x) \cdot e^{j\omega t}, \quad (2)$$

worin \hat{p} die Schalldruckamplitude, $k = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl, λ die Wellenlänge, $\omega = 2\pi f$ die Winkelgeschwindigkeit, f die Frequenz und p_k der komplexe Zeiger des Schalldrucks ist. Der Faktor $e^{-\alpha x}$ mit dem Dämpfungskoeffizienten $\alpha > 0$ beschreibt das Abklingen der Welle in einem verlustbehafteten Medium. Die Welle bewirkt eine Auslenkung eines Teilchens des Mediums, das um seine Ruhelage oszilliert. Die Geschwindigkeit dieses Teilchens wird durch die Schallschnelle $\vec{v}(x, t)$ beschrieben [20]:

$$\vec{v} = \frac{j}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (3)$$

woraus mit Gleichung 1 folgt:

$$\vec{v}(x, t) = \hat{v} \cdot e^{-(\alpha + jk)x} \cdot e^{j\omega t} \quad (4)$$

$$\vec{v}(x, t) = v_k(x) \cdot e^{j\omega t}. \quad (5)$$

Darin ist \hat{v} der Betrag der Schallschnelle und v_k der komplexe Zeiger. In einer im Freifeld laufenden, d. h. einer sich ohne Reflexionen ausbreitenden ebenen Welle sind Schallschnelle und Schalldruck in Phase. In diesem Fall berechnet sich die Intensität der Schallwelle aus dem Produkt der Effektivwerte von

Schnelle v_{eff} und Druck p_{eff}

$$I = p_{eff} \cdot v_{eff} \quad (6)$$

$$I = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (p_k^* \cdot v_k). \quad (7)$$

Dabei bezeichnet p_k^* den konjugiert komplexen Schalldruck. Die Leistung folgt durch Multiplikation mit der von ihr durchdrungenen Fläche:

$$P = p_{eff} \cdot v_{eff} \cdot A. \quad (8)$$

Zudem ist in Analogie zur Elektrotechnik die spezifische akustische Impedanz [17, 21] als Quotient aus Schalldruck p und dem Betrag der Schallschnelle v definiert:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (9)$$

$$Z = \rho \cdot c. \quad (10)$$

Dabei ist ρ die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit des Ausbreitungsmediums. Somit lässt sich der Betrag der Schallschnelle durch Einsetzen von Gleichung 9 in Gleichung 2 den Schalldruck ausdrücken:

$$\vec{v}(x, t) = \frac{p_k}{\rho c} \cdot e^{j\omega t}. \quad (11)$$

Da der Schalldruck eine Bandbreite von mehreren Größenordnungen überstreicht, wird er zur besseren Handhabung häufig als Pegel in Bezug auf eine Referenzgröße angegeben. Hier wird als Referenzgröße $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ verwendet, was der Hörschwelle bei 1 kHz entspricht. Der Schalldruckpegel berechnet sich dann nach

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}. \quad (12)$$

2.3.2 Ausbreitung an Phasengrenzen

In diesem Kapitel soll die Ausbreitung einer Ultraschallwelle beim Übergang von einem Medium mit der Impedanz $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0$ in ein angrenzendes Medium der Impedanz $Z_1 = \rho_1 \cdot c_1$ dargestellt werden, wie sie in der Grundlagenliteratur zur Ausbreitung von Ultraschall erläutert ist [15, 17]. Trifft eine sich in der x,y-Ebene eines verlustfreien Mediums (d. h. $\alpha = 0$) ausbreitende Schalldruckwelle $p_e(x, y, t)$ der Form

$$p_e(x, y, t) = \hat{p} \cdot e^{j(\omega t - kx \cos \vartheta - ky \sin \vartheta)} \quad (13)$$

auf eine Grenzfläche zu einem anderen Medium, wobei sie mit der Normalen dieser Grenzfläche den Winkel ϑ einschließt, wird ein Teil der Schallwelle reflektiert und der weitere Teil durch die Grenzfläche hindurch transmittiert. Die reflektierte Welle $p_r(x, y, t)$ lässt sich dann beschreiben als [15]

$$p_r(x, y, t) = \hat{p} |R_p| \cdot e^{j(\omega t + kx \cos \vartheta - ky \sin \vartheta + \beta)}. \quad (14)$$

Darin ist $|R_p|$ der Betrag des Reflexionsfaktors

$$r = |R_p| e^{j\beta}, \quad (15)$$

mit dem Phasenwinkel β . Entsprechend folgt für die transmittierte Welle

$$p_t(x, y, t) = \hat{p} |T_p| \cdot e^{j(\omega t - k_1 x \cos \vartheta_1 - k_1 y \sin \vartheta_1 + \gamma)}, \quad (16)$$

wobei analog zu Gleichung 15 $|T_p|$ der Betrag des Transmissionsfaktors und γ wiederum der Phasenwinkel ist. Die transmittierte Welle schließt mit dem Lot zur Grenzfläche nun den Winkel ϑ_1 ein.

An der Grenzfläche der Medien müssen die Kontinuitätsbedingung für den Schalldruck und die Schallschnelle erfüllt sein [17], sodass sich der Reflexionskoeffizient für den Schalldruck $R_p \equiv p/p_e$ bei senkrechtem Einfall ($\vartheta = 0$) zu [15]

$$R_p = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (17)$$

und entsprechend der Transmissionskoeffizient zu

$$T_p = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_0} \quad (18)$$

ergibt.

Die Koeffizienten für den Schalldruck sind jedoch von denen für die Intensität zu unterscheiden. Für die Intensitäten ist die Beziehung I_i/I_r und I_t/I_i zu berücksichtigen [17]. Wegen Gleichung 7 und Gleichung 9 gilt für senkrechten Einfall der Schallwelle $I = p^2/Z$ und somit für den Reflexionskoeffizienten der Intensität [17]

$$R_I = |R_p|^2 \quad (19)$$

und für den Transmissionskoeffizienten der Intensität [17]

$$T_I = \frac{Z_1}{Z_0} |T_p|^2. \quad (20)$$

Aus diesen Koeffizienten folgt, dass im Fall perfekter Anpassung der aneinandergrenzenden Medien, d. h. $Z_0 = Z_1$, wegen $T_p = T_I = 1$ die gesamte Intensität der einfallenden Welle in das angrenzende Medium übertragen wird und sich auch der Schalldruck ungestört fortsetzt. Demgegenüber stehen die Fälle starker Fehlanpassung $Z_0 \gg Z_1$ und $Z_1 \gg Z_0$. Für den ersten Fall wird $R_p \approx -1$, was bedeutet, dass die gesamte Schalldruckwelle mit einer Phasendrehung von 90° reflektiert und nur ein geringer Teil der Intensität transmittiert wird. Man kann in diesem Fall von einer freischwingernden Grenzfläche sprechen, was z. B. einer an Luft angrenzenden Flüssigkeitsoberfläche (in diesem Fall wäre T_I in der Größenordnung 10^{-3}) oder einem schallführenden Balkenende entspricht (schallweiche Reflexion) [17]. Der zweite dieser beiden Fälle verhält sich ähnlich: Eine Schallwelle wird nicht in ein angrenzendes Medium mit viel höherer Impedanz transmittiert sondern zurück in das Ausgangsmedium reflektiert, in diesem Fall jedoch ohne Phasendrehung (schallharte Reflexion) [15, 17].

Fällt der Schall eines Senders senkrecht (d. h. $\vartheta = 0$) auf einen idealen Reflektor ($R_p = 1$) bildet sich durch die Überlagerung der einfallenden Welle und reflektierten Welle (Gleichung 13 und Gleichung 14) eine stehende Welle aus. Dies führt zu einem Schalldruck von [20]

$$p(x) = \hat{p} (e^{jkx} + e^{-jkx}) \quad (21)$$

Damit folgt anhand von Gleichung 3

$$v(x) = \frac{\hat{p}}{Z} (e^{jkx} - e^{-jkx}) . \quad (22)$$

Schallschnelle und Schalldruck sind somit um 90° gegeneinander verschoben. In periodischen Abständen $l = n \cdot \lambda/2$ bilden sich Maxima aus [15, 20, 22]. Allerdings fallen, wegen der 90° Phasenverschiebung, Schalldruckmaxima stets mit Orten verschwindender Schallschnelle (im weiteren als Schallschnelleknoten bezeichnet) und umgekehrt zusammen.

2.3.3 Dämpfung, Streuung und Absorption

In diesem Abschnitt wird die Schwächung von Schallfeldern durch das Ausbreitungsmedium betrachtet. Dabei wird unterschieden in gasförmige Medien und Kolloide gegenüber Festkörpern. Unter Kolloiden werden dabei nach DUKHIN[23] fein verteilte Festkörper, Tröpfchen oder auch Blasen in einem Dispersionsmedium verstanden. Dazu zählen z. B. Staub-Luft-Gemische, Nebel oder kleine Bläschen in einer Flüssigkeit. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Schwächung der Schallwelle in einem verlustbehafteten Medium gemäß Gleichung 1 mit $e^{-\alpha x}$ erfolgt, wobei der Dämpfungskoeffizient α alle schwächenden Effekte zusammenfasst und mit der Frequenz ansteigt [16, 23].

Dämpfung in gasförmigen Medien und Kolloiden

Grundlegende Theorien und experimentelle Untersuchungen zur Dämpfung von Schallwellen in Gasen, Stäuben und Nebeln sind in den Arbeiten von EPSTEIN [24], BHATIA [25], LYMAN [26], ZINK [27], oder ALLEGRA [28] und Bass [29, 30] erarbeitet bzw. dargestellt worden. Die Arbeiten von DAIN [31] und EJAKOV [32] befassen sich mit der Absorption in unterschiedlichen Gasgemischen. In der Arbeit von DUNKHIN [23] sind differenzierte und vertiefte Theorien zur Dämpfung von Schallwellen in Kolloiden erläutert.

Die Dämpfung beschreibt die Schwächung eines Schallfeldes und setzt sich aus der Streuung und der Absorption zusammen. Die Streuung bezeichnet die Ablenkung der Schallwelle [23] durch Inhomogenitäten im Ausbreitungsmedium wie z. B. Festkörper oder Partikel [15]. Dagegen wird unter der Absorption die Umwandlung der akustischen Energie in Wärme verstanden [23]. Sie ist damit der Anteil der Dämpfung, der für die Zündgefahr maßgeblich ist. Demgegenüber vermindert die Streuung die Zündgefahr. Der Absorptionskoeffizient α_1 ergibt sich also aus Dämpfungskoeffizient α und Streuungskoeffizient α_2 :

$$\alpha_1 = \alpha - \alpha_2. \quad (23)$$

Die Messungen und Berechnungen von EPSTEIN [24] zur Dämpfung von Schallwellen im Frequenzbereich von 4 kHz bis 8 kHz durch Wassertröpfchen in Luft liefern Werte der Größenordnung 10^{-4} dB/cm. Dabei wird nicht zwischen Streuung und Absorption unterschieden. LYMAN [26] gibt für 1 μm bis 2 μm große Tropfen eine Dämpfung von maximal 10 dB/m bei 16 kHz und 14 dB/m bei 64 kHz an. Beide Ergebnisse zeigen, dass die Schwächung durch das jeweilige Kolloid in einem Volumen von wenigen Millimetern sehr schwach ist. BRANDT [33] erklärt das Ansteigen der Absorption durch Schwebstoffe in Luft damit, dass die Partikel bei tieferen Frequenzen mit der Schallwelle

mitschwingen. Bei Frequenzzunahme können sie auf Grund ihrer Trägheit oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz zurückbleiben und so immer mehr als Hindernisse auftreten, die die Schallwelle streuen.

Auch in Gasen ist die akustische Absorption gering. In der Arbeit von EJAKOV [32] wurde die akustische Absorption durch Gasgemische unterschiedlicher Konzentrationszusammensetzung experimentell und anhand von Modellrechnungen untersucht. Verwendet wurde Luft, sowie Sauerstoff-Stickstoff, Methan-Stickstoff, Kohlendioxid-Stickstoff und Wasserstoff-Stickstoff. Als Maß für die Absorption dient dabei der auf die Wellenlänge normierte Absorptionskoeffizient. Der Maximalwert liegt als Absorptionsband bei 0,1 für 80% Kohlendioxid in Stickstoff bei einer Frequenz von ca. 130 kHz. Für alle anderen Gemische steigt die Absorption mit der Frequenz an und erreicht ihr Maximum von 0,04 bei 10 MHz.

Absorption durch Festkörper

Wenn die in einem flüssigen oder gasförmigen Ausbreitungsmedium geführte Schallwelle von einem Festkörper absorbiert werden soll, ist eine wichtig Voraussetzung, dass seine spezifische akustische Impedanz die Größenordnung des Ausbreitungsmediums aufweist, damit die Schallwelle in den Absorberkörper transmittiert werden kann. MECHEL [21] beschreibt die Absorption von Festkörpern gegenüber akustischen Wellen in Luft, wobei sich diese Betrachtungen auf den Frequenzbereich des Hörschalls (obere Grenzfrequenz 20 kHz) beziehen. Dennoch liefern sie wichtige Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit. Für hochfrequenten Schall ab dem kHz-Bereich eignen sich nach [34–36] insbesondere poröse Festkörper mit offenen Poren. Die Porosität σ ergibt sich aus dem Verhältnis seines Raumgewichts ρ_R zu der Dichte des kompakten Materials des Stoffes ρ_G über [21]

$$\sigma = 1 - \frac{\rho_R}{\rho_G}. \quad (24)$$

Ihre Absorptionswirkung ist auf die große innere Oberfläche und die daraus resultierende erhöhte Wechselwirkung mit dem inneren Schallfeld zurückzuführen. Dabei kann diese Wechselwirkung in zwei wesentliche Mechanismen unterteilt werden: Der erste Mechanismus ist die Reibung des viskosen Gases mit den Poren bzw. Fasern. Sind die Poren oder Faserabstände gleich oder kleiner als die Reibungs-Grenzschichtdicke [21] zwischen den Porenwänden oder Fasern, überlagern sich die Reibungsgrenzschichten, was die Absorption verstärkt. Der zweite Mechanismus rührt von der periodischen Kompression der Luft innerhalb des Absorbers her.

2.3.4 Richtwirkung und Fokussierung

Ist die schallemittierende Fläche des Schallsenders kleiner als die Wellenlänge wirkt sie als Punktschallquelle [15] und die Schallwelle bildet sich kugelförmig in alle Richtungen aus. Wegen der kurzen Wellenlänge im Ultraschallfrequenzbereich lassen sich jedoch leicht Schallsender mit großen Abmessungen im Vergleich zur Wellenlänge herstellen. In diesem Fall läuft die Schallwelle zunächst als gerichteter Schallstrahl in den Raum. Dieser Bereich wird als Nahfeld bezeichnet. Erst in einem gewissen Abstand verliert sie ihre Strahlcharakteristik und läuft, im sog. Fernfeld, auseinander. Ausgehend von einer kreisförmigen Abstrahlfläche mit einem Durchmesser D liegt die Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld im Abstand [17]

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}. \quad (25)$$

Die Richtwirkung fällt demzufolge um so stärker aus, je größer der Durchmesser der Schallquelle im Vergleich zu seiner Wellenlänge ist [15].

Durch konkav geformte Sender, akustische Hohlspiegel oder Sammellinsen lässt sich Ultraschall über die oben beschriebene Richtwirkung hinaus in Abhängigkeit von der Brennweite F bündeln. Die Weite des Bündels als Abnahme der Intensität auf die Hälfte des Maximums lässt sich abschätzen zu [37]

$$w = 0.71 \cdot \frac{\lambda F}{D}. \quad (26)$$

2.4 Anwendungen von Ultraschall

Die Anwendungsgebiete von Ultraschall sind zahlreich und nehmen ständig zu. Eine vollständige und detaillierte Übersicht würde deshalb an dieser Stelle zu weit führen. Dennoch gibt es Bereiche, die für die Forschungsfragestellung nach der Zündwirksamkeit von Ultraschall besonders herausgestellt werden können. Um die Bandbreite der Anwendungen über unterschiedliche Branchen aufzuzeigen, liefert Tabelle 1 eine Übersicht über Anwendungen von Ultraschall in der Messtechnik, der Prozesstechnik, der Medizintechnik und der Metallurgie mit den typischerweise verwendeten Frequenzbereichen. Es zeigt sich, dass viele dieser Anwendungen mit explosionsfähiger Atmosphäre in Kontakt kommen können. In den prozesstechnischen und metallurgischen Anwendungen macht man sich die akustische Kavitation zu nutze, die durch starke Ultraschallfelder in Flüssigkeiten angeregt wird (vgl. Kapitel 5).

Tabelle 1: Anwendungen von Leistungs-Ultraschall [16, 17, 19, 38]

Anwendungs- gebiet	Verfahren	Medium	Frequenz- bereich	EX- Atmosphäre
Mess- und Medizintechnik	Durchflussmessung	flüssig, gasförmig	bis 2 MHz	Gase/Dämpfe
	Füllstandsmessung	fest, flüssig	20 kHz - 100 kHz	Stäube/Dämpfe
	Entfernungsmessung	fest, flüssig, gasförmig	15 kHz - 10 MHz	ev. Gase, Dämpfe
	Ultraschallbildgebung	Wasser, Gewebe	1 MHz - 100 MHz	Anästhetika
	Tumorbehandlung	Wasser, Gewebe	250 kHz - 2,5 MHz	Anästhetika
Fügen, Umformen	Ultraschall- Schweißen	fest	20 kHz - 40 kHz	Klebestellen, Tenside, Lösungsmittel
	Ultraschall-Löten	fest, z.B. Kunststoffe, Keramik, Glase, Metall	20 kHz - 40 kHz	Klebestellen, Tenside, Lösungsmittel
	Ultraschall-Bohren	fest, z.B. Kunststoffe, Keramik, Glase, Metall	20 kHz - 40 kHz	
Prozesstechnik	Reinigen	flüssig	20 kHz - 1 MHz	Dämpfe, Nebel
	Sieben	gasförmig	20 - 50 kHz	Stäube
	Homogenisieren, Emulgieren, Zelldesintegration	flüssig	20 kHz	Dämpfe, Nebel
	Zerstäuben von Flüssigkeiten	flüssig, z.B. Wasser, Anästhetika, Treibstoffe	20 kHz - 3 MHz	Dämpfe, Nebel
	Entgasen von Flüssigkeiten	flüssig	20 kHz - 40 kHz	Dämpfe, Nebel
	Aquasonolyse	flüssig	100 kHz - 1 MHz	Dämpfe, ev. Gase
Erzaufbereitung, Metallurgie	Flotation	wässrig mit Zusätzen (Säure, Basen, Öle)	20 kHz	Schäume, Dämpfe
	Desintegration von Festkörpern	Alkohol, Benzin	variabel, Mehrfrequenz- verfahren	Dämpfe
	Hydrometallurgie	wässrige Lösung, Säure	20 kHz	Dämpfe
	Pyrometallurgie	Schmelzen	20 kHz	

3 Zündwirksamkeit von Ultraschall in Gasen, Dämpfen und Stäuben

3.1 Theoretische Betrachtungen

Ziel der theoretischen Überlegungen in diesem Abschnitt ist es, die Worst-Case-Situation bzgl. Ultraschallfeldern in gasförmigen Atmosphären herauszuarbeiten. Es sollen Bedingungen gefunden werden, die eine Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch den direkt in diese Gasphase eingekoppelten Ultraschall provozieren könnten.

LIERKE [39] berichtet von Erhöhungen des Schalldruckpegels in resonanten Stehwellenfeldern, wo es zu einer konstruktiven Überlagerung der einfallenden Welle mit der an einer Grenzfläche reflektierten Welle kommt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Diese können bis zu 20 dB gegenüber fortschreitenden Schallwellen erreichen [39]. Daher sollte zunächst das Erwärmungsverhalten im Ultraschallfeld unter verschiedenen Bedingungen betrachtet werden. In Anlehnung an NYBORG [40] lassen sich die Erwärmungsraten im Stehwellenfeld mit denen einer fortschreitenden ebenen Welle vergleichen.

Nach NYBORG [40] lässt sich für eine fortschreitende Welle in einem verlustbehafteten Medium nach Gleichung 1 die zeitlich gemittelte Wärmeentstehung $\langle q_v \rangle$ aus der Intensität (siehe Gleichung 6) und dem Absorptionskoeffizienten α_1 (siehe Gleichung 23) ermitteln.

$$\langle q_f \rangle = 2\alpha_1 I. \quad (27)$$

Für die Intensität ergibt sich dabei

$$I = \frac{\hat{p}^2}{\rho c} \cdot e^{-2\alpha_1 x}. \quad (28)$$

Aus Kombination von Gleichung 27 und Gleichung 28 folgt für die Wärmeerzeugung der ebenen Welle:

$$\langle q_f \rangle = \frac{\alpha_1 \hat{p}^2}{\rho c} \cdot e^{-2\alpha_1 x}. \quad (29)$$

Darin ist erkennbar, dass die Erwärmungsrate exponentiell mit der Entfernung vom Sender abnimmt.

Für das Feld einer stehenden Welle als Überlagerung zweier identischer Wellen, die in entgegengesetzte Richtungen laufen und sich dabei überlagern (vgl. Gleichung 21), ergibt sich für den Schalldruck in einem verlustbehafteten Medium [40]:

$$p(x, t) = \hat{p} \cdot e^{-\alpha_1 x} e^{j(\omega t - kx)} + \hat{p} \cdot e^{+\alpha_1 x} e^{j(\omega t + kx)} \quad (30)$$

$$p(x, t) = p_{k,st} \cdot e^{j\omega t} \quad (31)$$

(Indizes k: komplex, st: Stehwelle)
und für die Schallschnelle [40]:

$$v(x, t) = \frac{\hat{p}}{\rho c} \cdot (k - j\alpha_1) \cdot e^{j\omega t} (e^{ax} - e^{-ax}) \quad (32)$$

$$v(x, t) = v_{k,st} \cdot e^{j\omega t}. \quad (33)$$

Dabei wurde zur Vereinfachung $a = \alpha_1 + jk$ verwendet. Für die Intensität folgt dann:

$$I = -2I_0 \left(\sinh(2\alpha_1 x) + \frac{\alpha_1}{k} \sin(2kx) \right) \quad (34)$$

Darin ist $I_0 = \hat{p}^2/2\rho c$. Im Fall von vernachlässigbarer Absorption verschwindet die Intensität im Stehwellenfeld und es wird keine Energie übertragen. Absorbiert das Ausbreitungsmedium jedoch die Schallwelle, erwärmt es sich gemäß [40]

$$\langle q_{sw} \rangle = -\nabla I, \quad (35)$$

woraus

$$\langle q_{sw} \rangle = 4\alpha_1 \frac{\hat{p}^2}{\rho c} \cos^2(kx) \quad (36)$$

folgt. Daraus ist ersichtlich, dass die Erwärmung im Stehwellenfeld mit $\cos^2(kx)$ vom Ort abhängt und stets für $x = n \cdot \lambda/2$ mit $n \in \mathbb{N}$ maximal wird. Die Orte maximaler Erwärmung fallen somit mit den Schalldruckbäuchen der stehenden Welle zusammen. In den Schallschnellebäuchen ist sie dagegen gleich Null. Zudem ist die maximale Erwärmung im Stehwellenfeld um den Faktor 4 größer als im Fall der fortschreitenden Welle nach Gleichung 29.

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, ist die Absorption in Gasen, Dämpfen und Stäuben im kHz-Bereich jedoch gering. Entsprechend kann es in explosionsfähigen Atmosphären nicht zu einer Erwärmung über die Zündtemperaturen von mindestens 95°C (Schwefelkohlenstoff, [5]) kommen. Eine direkte Zündung lässt sich somit ausschließen. Allerdings könnten Festkörper mit hohen Absorptionskoeffizienten im Schallfeld die akustische Energie in Wärme umwandeln, sodass es zu einer Zündung an der heißen Oberfläche dieser durch das Ultraschallfeld erwärmten Körper kommen könnte. Nach Abschnitt 2.3.3 kommen dafür insbesondere poröse Materialien mit offenen Poren in Frage.

Während im freien Medium angenommen werden kann, dass es bei der Kompression und Dekompression zu einer adiabatischen Temperaturerhöhung und -verringerung kommt, wird innerhalb des Absorbers die in der Kompression erzeugte Wärme von dem Fasermaterial aufgenommen, da es eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist als das umgebende Gas [34]. Nach MECHEL [34] wird es dennoch zu keiner signifikanten Temperaturerhöhung im Absorber kommen. Die Wärmekapazität des Festkörpers ist höher als die der Luft. Für tiefe Frequenzen wird einerseits die Wärme entsprechend ins Innere des Absorbermaterials abgeleitet. Für hohe Frequenzen, auf der anderen Seite, argumentiert MECHEL [34], dass der Energieaustausch zwischen Gasphase und Festkörper wegen der begrenzten thermischen Leitfähigkeit des Festkörpers nicht erfolgt und die Zustandsänderung durch die Schallwelle wieder adiabat erfolgt.

Allerdings beziehen sich diese Überlegungen auf den Frequenzbereich des Hörschalls und - implizit - auf voluminöse und ausgedehnte Absorberkörper. Fraglich ist, ob es im Ultraschallbereich bei Verwendung kleiner Zielkörper im Stehwellenfeld möglich ist, die Absorptionseigenschaften von porösen Festkörpern auszunutzen, um „Hot-Spots“ (kleine heiße Oberflächen) zu erzeugen. So könnte es sein, dass diese Festkörper sich erwärmen, da die Wärmekapazität von kleinen Zielkörpern mit feinporigen Strukturen gering ist und die Beschleunigung der Gasteilchen höher ist. Zudem lassen sich in Ultraschallfeldern höhere Schalldrücke als im Frequenzbereich des Hörschalls erzeugen.

Als Worst-Case-Situation für die Entstehung einer Zündquelle in allen Arten von explosionsfähigen Atmosphären wird deshalb ein poröser Körper im Schalldruckbauch eines Stehwellenfeldes gesehen. Hinsichtlich der Frequenz wird niederfrequenter Ultraschall als kritischer Fall und gleichzeitig sehr praxisnaher Fall eingestuft. Wegen der längeren Wellenlänge und der geringeren Dämpfung als im hochfrequenten Bereich ist die Eindringtiefe größer. Der Zielkörper kann entsprechend weiter von der Ultraschallquelle entfernt sein. Zudem sind wegen der längeren Wellenlänge auch die Schalldruckbäuche als Bereiche großer Erwärmung nach Gleichung 36 ausgedehnter, sodass größere Zielkörperstrukturen in Frage kommen. Da die Zündwirksamkeit von heißen Oberflächen mit der Fläche zunimmt, sollte das die Zündwirksamkeit erhöhen [4, 6]. Entsprechend der Untersuchungen nach GALLEGO-JUAREZ [41] ist dieser Bereich für die industrielle Anwendung zudem am sinnvollsten. Diese Worst-Case-Situation ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

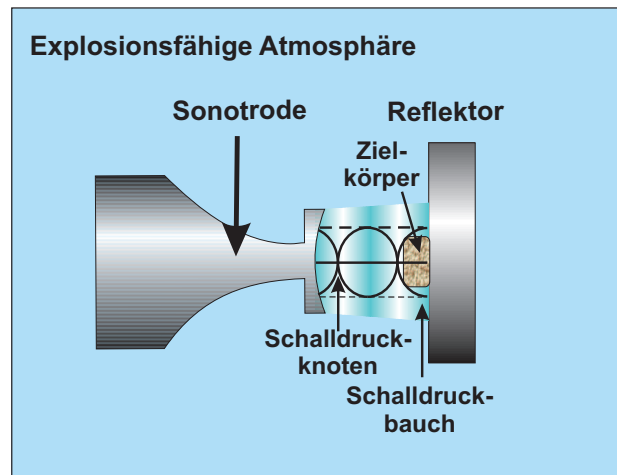


Abbildung 2: Worst-Case-Situation für Ultraschall in gasförmigen Medien

3.2 Versuchsanordnung

3.2.1 Voruntersuchungen im Ultraschallstehwellenfeld

Entsprechend der theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 3.1 ist die Erwärmung eines Festkörpers im Ultraschallfeld Voraussetzung für eine Entzündung. Vor der Durchführung von Zündversuchen in explosionsfähiger Atmosphäre mit Ultraschall wurde deshalb die Erwärmung von Zielkörpern unterschiedlicher Porosität im Ultraschallstehwellenfeld experimentell untersucht. In Abbildung 3 ist der dazu verwendete Versuchsaufbau schematisch dargestellt, der im Rahmen der Arbeit von STEINBERG [42] entwickelt wurde.

Kern dieser Versuchsanordnung ist die Ultraschall-Erzeuger-Einheit mit einer Resonanzfrequenz von 20 kHz. Sie besteht aus dem piezoelektrischen Wandler, einem Booster und einer Sonotrode aus der Ultraschall-Levitation. Die Sonotrode wirkt dabei als Schnelletransformator, sodass sich sehr hohe Schallpegel erzeugen lassen. Wie die Sonotrode wirkt auch der Booster durch die Querschnittsreduktion als Schnelletransformator und erzeugt eine Erhöhung der Schwingungsamplitude. Er ist mit der Sonotrode fest verbunden, die wiederum durch Querschnittsreduktion eine weitere Erhöhung der Schwingungsamplitude bewirkt und gleichzeitig an ihrer Stirnfläche die Ultraschallwelle in die Gasphase abstrahlt. Bei jeder Amplitudenerhöhung nach diesem Prinzip erhöhen sich jedoch auch die Spannungen innerhalb des Materials des Schnelletransformators. Während der Booster aus Aluminium besteht wurde für die Sonotrode deshalb Titan verwendet.

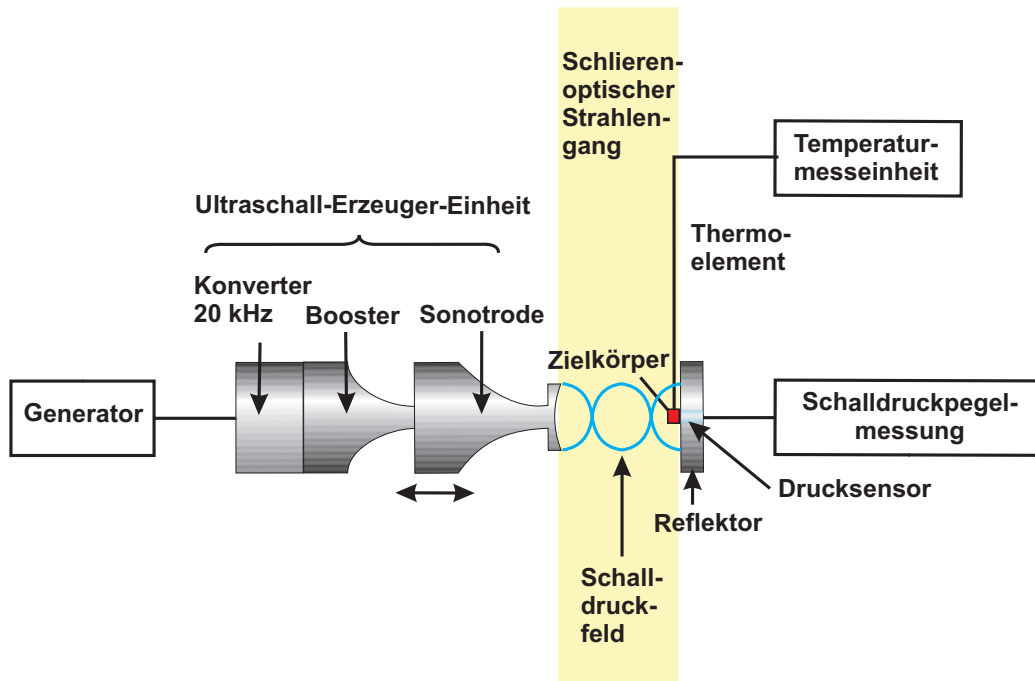


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Erwärmung von Zielkörpern unterschiedlicher Porosität im Ultraschallstehwellenfeld

Die Ultraschall-Erzeuger-Einheit wurde von der Universität Paderborn zur Verfügung gestellt. Dort wurde sie zu Levitation oder zur Zerstäubung von Polymerschmelzen zu feinen Lacken verwendet [43–45]. Der Generator regelt das System auf den Resonanzstrom. Booster und Sonotrode sind dabei Wellenleiter und haben jeweils eine Länge von $\lambda/4$, sodass die Schwingungsamplitude an der Verbindungsstelle Null ist, an der Sonotrodenstirnfläche aber gleichzeitig die maximale Schwingungsamplitude erzielt wird. Die Stirnfläche hat einen Durchmesser von 35 mm und ist konkav geformt. Dieser Durchmesser entspricht der doppelten Wellenlänge der 20 kHz Schallwelle in Luft (circa 17 mm), sodass eine gerichtete Abstrahlung der Ultraschallwelle erzielt wird.

Die freie Abstrahlung der Sonotrode in die Gasatmosphäre ist in Abbildung 4 mittels refrakto-vibrometrischer Darstellung („refracto-vibrometry“ [46], auch „laser-scanning vibrometry“ [47]) sichtbar gemacht. Die Darstellung wurde an der Universität Paderborn am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik erstellt [48]. Es wird deutlich, dass sich die Ultraschallwelle im Bereich direkt vor der emittierenden Fläche annähernd als ebene Welle ausbreitet.

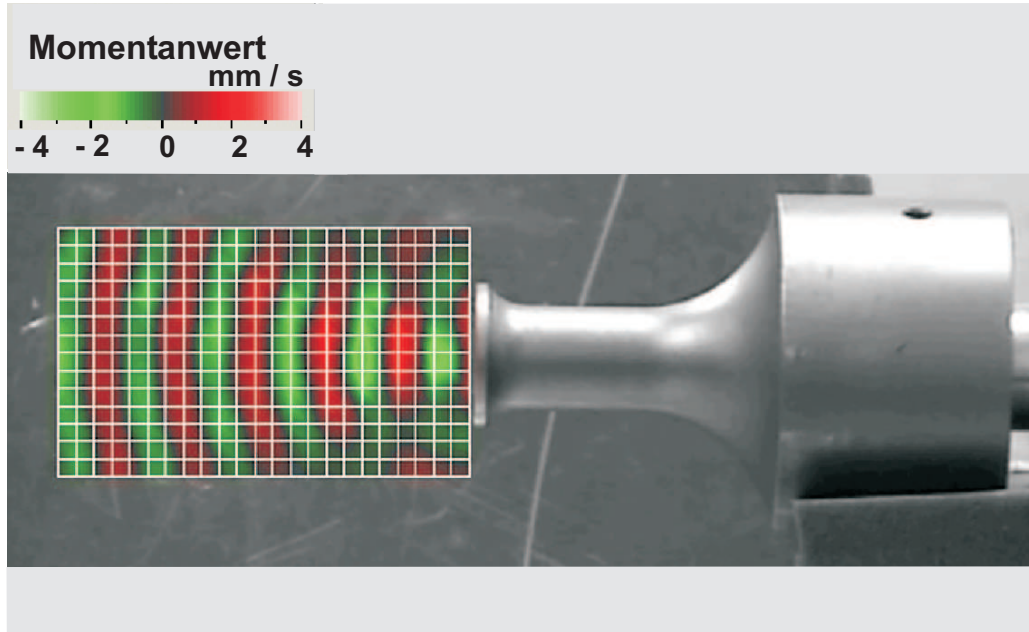


Abbildung 4: Refrakto-vibrometrische Darstellung des Schallfeldes der Sonotrode

In der Versuchsanordnung nach Abbildung 3 steht dieser Sonotrode ein Stahlreflektor gegenüber. Die Sonotrode lässt sich gegenüber diesem in 0,1 mm-Schritten verschieben. Angesichts der Resonanzfrequenz der Sonotrode von 20 kHz sind Schalldruckbäuche bei Sonotroden-Reflektor-Abständen von 8,5 mm, 17 mm und 25,5 mm zu erwarten.

Zielkörper unterschiedlicher Porosität wurden mit einem Thermoelement bestückt und auf der Reflektoroberfläche befestigt, da sich an dieser Stelle gemäß Gleichung 31 ein Schalldruckbauch ausbildet, wenn die Resonanzbedingung erfüllt ist. Zusätzlich konnte der Zielkörper bei fest eingestelltem Resonanzabstand zwischen Sonotrode und Reflektor auch relativ zum Schallfeld verschoben werden. Die Temperaturmessung mit dem Thermoelement (Typ K, Nickel-Chrom/Nickel) erfolgte jeweils im Kern des Zielkörpers.

Zur Messung des Schalldruckpegels in dB (re. $20 \mu\text{Pa}$) wurde ein breitbandiger dynamischer Druckaufnehmer (PCB Piezotronics, Modell 112A22, Resonanzfrequenz 250 kHz) verwendet, der an einen Messverstärker (Brüel&Kjær, Typ 2610) angeschlossen war. Zudem wurde das Schallfeld mittels eines schlierenoptischen Strahlengangs sichtbar gemacht, sodass sich Schalldruck-

bäuche von Schalldruckknoten bzw. Schallschnelleknoten von Schallschnellebäuchen visuell unterscheiden ließen. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5 für einen Sonotroden-Reflektor-Abstand von $d = \lambda$ dargestellt [42].

Für die Untersuchungen der Erwärmung von Zielkörpern im Ultraschallstehwellenfeld wurden ein Melaminharz-Schaumstoff (Produktname „Basotect“), eine Erdalkali-Silikat-Wolle (Produktname „Insulfrax“), Steinwolle und Gips verwendet. Die Proben waren würfelförmig, mit Kantenlängen von 5 mm.

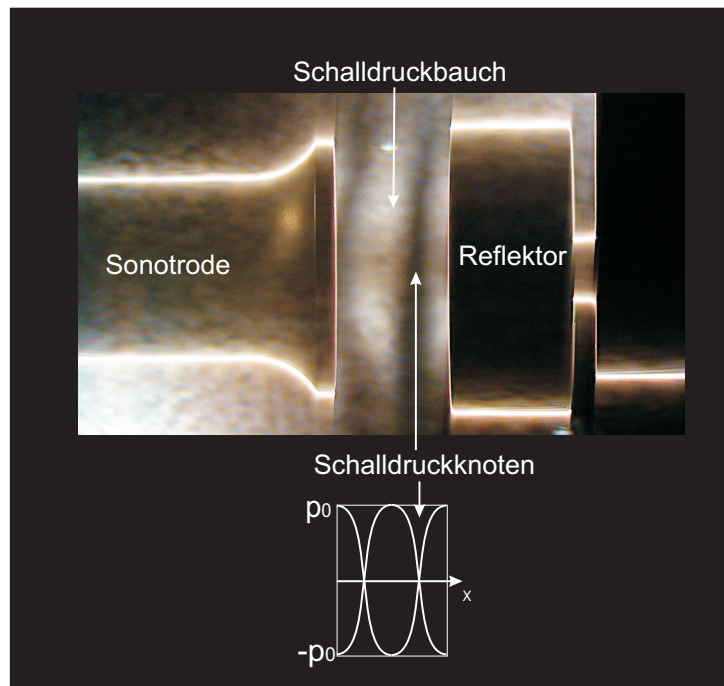


Abbildung 5: Schlierenoptische Darstellung des Ultraschallstehwellenfeldes bei einem Sonotroden-Reflektor-Abstand von $d = \lambda$. Die dunklen Bereiche sind Schalldruckknoten bzw. Schallschnellebäuche, die hellen Bereiche Schalldruckbäuche bzw. Schallschnelleknoten. Darunter ist qualitativ der Verlauf des Schalldrucks $p(x)$ dargestellt.

3.2.2 Zündversuche: Versuchsanordnung und Durchführung

Für die Durchführung von Zündversuchen wurde ein modifiziertes Hartmann-Rohr verwendet. Die Bestimmung der Mindestzündenergie mit dem Hartmann-Rohr stellt ein standardisiertes Verfahren (DIN EN 13821 [49]) zur Beurteilung von Staub-Luft-Gemischen dar. Dabei handelt es sich um eine senkrecht stehende Röhre mit einem Volumen von 1,2 l, an deren Boden ein

Zerstäuberpilz zum Aufwirbeln von Staub angebracht ist. Die obere Öffnung ist mit einer Druckentlastungsklappe verschlossen, die mit einem Zählwerk verbunden ist.

Für die Verwendung von Dämpfen wurde das Hartmann-Rohr gasdicht abgeschlossen und als Druckentlastung eine Berstfolie an der oberen Rohröffnung fixiert. Der Zerstäuberpilz wurde gegen Anschlüsse an eine Gemischaufbereitung und an einen paramagnetischen Sauerstoffanalysator (Siemens Oxy-mat 6F) ausgetauscht. Bei Einleitung eines Brennstoff-Luft-Gemisches in die Messzelle des Oxy-maten reduziert sich die Sauerstoffkonzentration in der Messzelle gegenüber dem Startwert ($c_0 = 20,95\%$, trockene Luft) bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist (c_{mix}). Auf diese Weise ließen sich die verwendeten Dampf-Luft-Gemische in der gewünschten Konzentration einleiten.

Auf einem Drittel der Rohrhöhe ist eine Elektrodenanordnung in das Rohr eingelassen, die einen elektrischen Funken einstellbarer Energie (Kondensatorentladung) als Zündquelle in die aufgewirbelte Staubwolke einkoppeln kann. Diese Elektrodenanordnung wurde für die Zündversuche mit Ultraschall gegen die Ultraschall-Erzeuger-Einheit und den Reflektor ausgetauscht. Diese Anordnung ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

In den Reflektor ist der PCB Druckaufnehmer so integriert, dass seine aktive Fläche bündig mit der Reflektoroberfläche abschließt. Der Zielkörper lässt sich mit Drähten wiederum auf der Reflektoroberfläche befestigen. Als Zielkörpermateriale wurde die Erdalkali-Silikat-Wolle (Produktname „Insulfrax“) verwendet, die Abmessungen betrugen $10\text{mm} \cdot 10\text{mm} \cdot 5\text{mm}$, wobei 5 mm die Stärke des Zielkörpers war. Die Vergrößerung der Zielkörperfläche parallel zur Reflektoroberfläche war notwendig, da bei sehr hohen Schalldruckpegeln die Kräfte im Schallfeld zu einer Zerstörung der Fasern der Erdalkali-Silikat-Wolle von kleineren Körpern geführt hätten. Diese Reflektoreinheit ist in Abbildung 7 dargestellt.

Bevor Zündversuche im Hartmann-Rohr durchgeführt werden konnten, wurde im Rahmen der Arbeit von BELOW [50] der optimale Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor zur Erwärmung des Zielkörpers ermittelt. Dazu wurde bei festen Setzspannungen von 30 mV, 60 mV, 80 mV und 100 mV der Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor in 1 mm-Schritten verkleinert und für jeden Schritt der an der Reflektoroberfläche herrschende Schalldruckpegel bestimmt. Anschließend wurde der Erdalkali-Silikat-Zielkörper an der Reflektoroberfläche befestigt und die sich einstellende Gleichgewichtstemperatur für jede dieser Positionen gemessen.

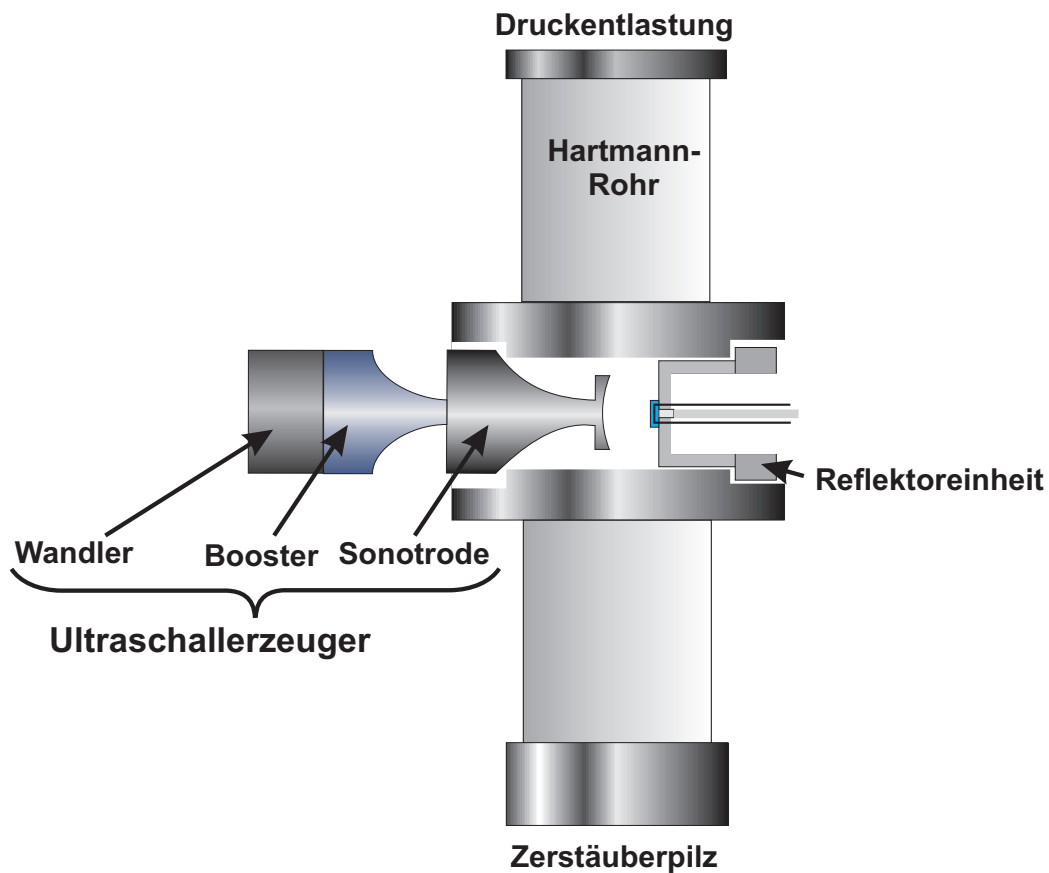


Abbildung 6: Hartmann-Rohr für Zündversuche in Staub-Luft-Gemischen

Für die Zündversuche im Hartmann-Rohr wurde der Zerstäuberpilz im Hartmann-Rohr mit einer auf 0,1 g abgewogenen Staubmenge befüllt, die Temperaturmessung gestartet und der Ultraschall eingeschaltet. Die Masse der Stäube betrug zwischen 0,5 g und 2,3 g bzw. 0,4 g/l bis 1,8 g/l bezogen auf das Volumen des Rohres von 1,2 l. Der Zielkörper aus Erdalkali-Silikat-Wolle wurde durch das Ultraschallstehwellenfeld auf seine Gleichgewichtstemperatur erwärmt. Nach 30 Sekunden wurde der Zerstäuberpilz über einen Druckluftstoß ausgelöst und der Staub damit aufgewirbelt. Dabei durchlief dieser in unterschiedlichen Konzentrationen das Ultraschallfeld und strich an dem Zielkörper vorbei. Während der ganzen Zeit wurde die Temperatur im Kern des Zielkörpers aufgezeichnet.

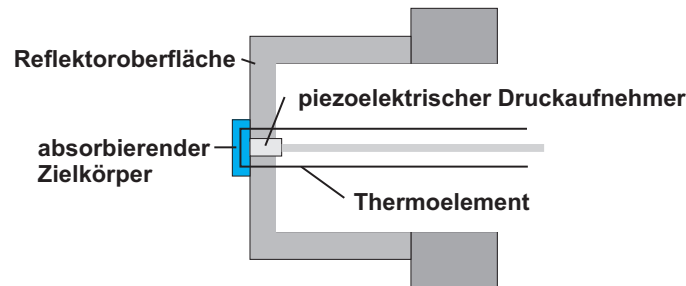


Abbildung 7: Reflektoreinheit bestehend aus Reflektor, piezoelektrischem Druckaufnehmer (PCB 112A22) und Zielkörper mit integriertem Thermoelement.

Im Fall einer Nichtzündung wurde der sich wieder abgelagerte Staub durch einen zweiten Druckstoß erneut aufgewirbelt. Nach dieser Prozedur wurden zwei Serien von Zündversuchen gefahren. In der ersten Serie wurden Stäube aus Schwefel, Mais und Calciumstearat verwendet [50]. Die Ultraschall-Erzeuger-Einheit wurde bei diesen Zündversuchen durch die hohe Belastung beschädigt. Deshalb wurden später mit einer gleichartigen Anlage im gleichartigen Versuchsaufbau zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nochmals Schwefel verwendet und zusätzlich Aluminiumstaub und Magnesiumstaub. Alle Stäube waren zuvor vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) hinsichtlich ihrer sicherheitsrelevanten Größen untersucht worden (vgl. Anhang D). Zusätzlich zu den Stäuben wurden in der gleichen Anordnung auch Zündversuche mit Dämpfen durchgeführt, die entsprechend der Einteilung in Temperaturklassen repräsentativ für alle Gase und Dämpfe sind. So wurden Schwefelkohlenstoff¹, Diethylether, n-Heptan und n-Pentan verwendet.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

In Voruntersuchungen in der Versuchsanordnung nach Abbildung 3 war der Einfluss des Zielkörpermateri als und des Abstandes zwischen Sonotrode und Reflektor auf die Zielkörpertemperatur im Ultraschallstehwellenfeld untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Temperaturkurven zeigen einen qualitativ übereinstimmenden Verlauf: Bei bestimmten Abständen zwischen Sonotrode und Reflektor kommt es zu sprunghaftem

¹Schwefelkohlenstoff ist schon in geringen Konzentrationen leichtentzündlich und sehr giftig. Bei der Verwendung müssen unbedingt die Hinweise aus dem Sicherheitsdatenblatt beachtet und angemessene Schutzmaßnahmen getroffen werden.

Anstieg der Erwärmung des Zielkörpers. Die maximal erreichten Temperaturanstiege an diesen Stellen werden umso höher, je kleiner der Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor ist.

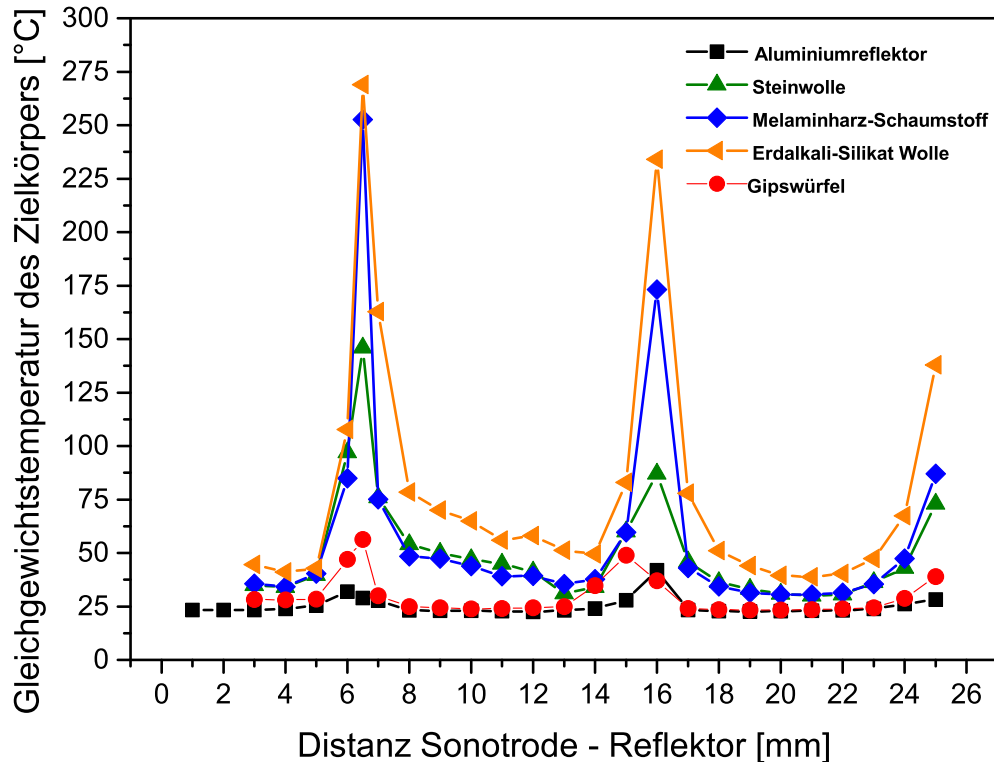


Abbildung 8: Ergebnisse zum Einfluss des Zielkörpermateri als und der Abstandes zwischen Sonotrode und Reflektor auf die Zielkörpertemperatur im Ultraschallstehwellenfeld

Die höchste Zielkörpertemperatur wurde für die Erdalkali-Silikat Wolle ermittelt. Die nächst höchsten Temperaturen zeigten der Melaminharz-Schaumstoff und danach die Steinwolle. Allerdings ist die maximale Temperatur von Steinwolle bereits nur noch halb so hoch wie die der Erdalkali-Silikat-Wolle. Der Zielkörper aus Gips erwärmte sich nur auf Temperaturen unterhalb von 50°C. Die Messung der Lufttemperatur direkt vor dem Reflektor ergab vernachlässigbare Temperaturerhöhungen. Die Sonotroden-Reflektor-Abstände der Temperaturmaxima liegen bei 7 mm, 16 mm und 25 mm.

Der starke Einfluss des Zielkörpermaterials bestätigt die Überlegungen nach Abschnitt 3.1. Die hoch porösen und flexiblen Materialien Erdalkali-Silikat-Wolle und Melaminharz-Schaumstoff sowie Steinwolle erzielen die höchsten Temperaturen, während Gips als weniger poröser Körper sich weniger stark erwärmt. Zur Überprüfung wurden auch Versuche mit porösen aber unflexiblen Zielkörpern wie offenporigem Glasschaum (Produktname „Reapor“), sowie porösem Graphit durchgeführt. In diesen konnte jedoch keine nennenswerte Temperaturerhöhung gemessen werden. Ohne Zielkörper werden im Ultraschallstehwellenfeld letztlich nur geringe Temperaturerhöhungen erzielt, die keine Zündgefahr hervorrufen.

Darüber hinaus stimmen die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen mit den theoretischen Vorhersagen zur Position der höchsten Erwärmungsraten überein. Die höchsten Temperaturerhöhungen erfolgen immer bei Sonotroden-Reflektor-Abständen von $n \cdot \lambda/2$. In diesen Situationen baut sich eine stehende Welle auf, und an der Reflektoroberfläche ist ein Schalldruckbauch.

Um zu überprüfen, ob die Erwärmung tatsächlich immer im Schalldruckbauch des Stehwellenfeldes maximal ist, wurde ein Melaminharz-Schaumstoff Zielkörper bei festem Abstand zwischen Sonotrode und Reflektor relativ zum Ultraschallstehwellenfeld verschoben. Außerdem wurde der Schalldruckpegel entlang der Schallfeldachse gemessen. Zu diesem Zweck wurde der PCB Druckaufnehmer seitlich in das Schallfeld eingeführt, sodass seine aktive Fläche parallel zur Schallfeldachse lag. Die Ergebnisse von Schallfeldmessung und Temperaturmessung sind in Abbildung 9 dargestellt.

Es bestätigten sich die Vorüberlegungen, dass die stärkste Erwärmung im abgestimmten Ultraschallstehwellenfeld in den Schalldruckbäuchen auftritt. Außerdem zeigte sich, dass die Erwärmung bei kürzeren Resonanzabständen gegenüber längeren Abständen stärker ausfällt.

Bei der Verschiebung war der Zielkörper an gespannten Drähten befestigt. Anders als an der Reflektoroberfläche, die zusätzlichen Halt gab, versuchten die Kräfte des Stehwellenfeldes bei der Verschiebung des Zielkörpers stets, den Körper in den nächsten Schalldruckknoten zu drücken. Deshalb war diese Messung unter Verwendung der Erdalkali-Silikat-Wolle nicht möglich, da die Faserstruktur dabei zerstört wurde.

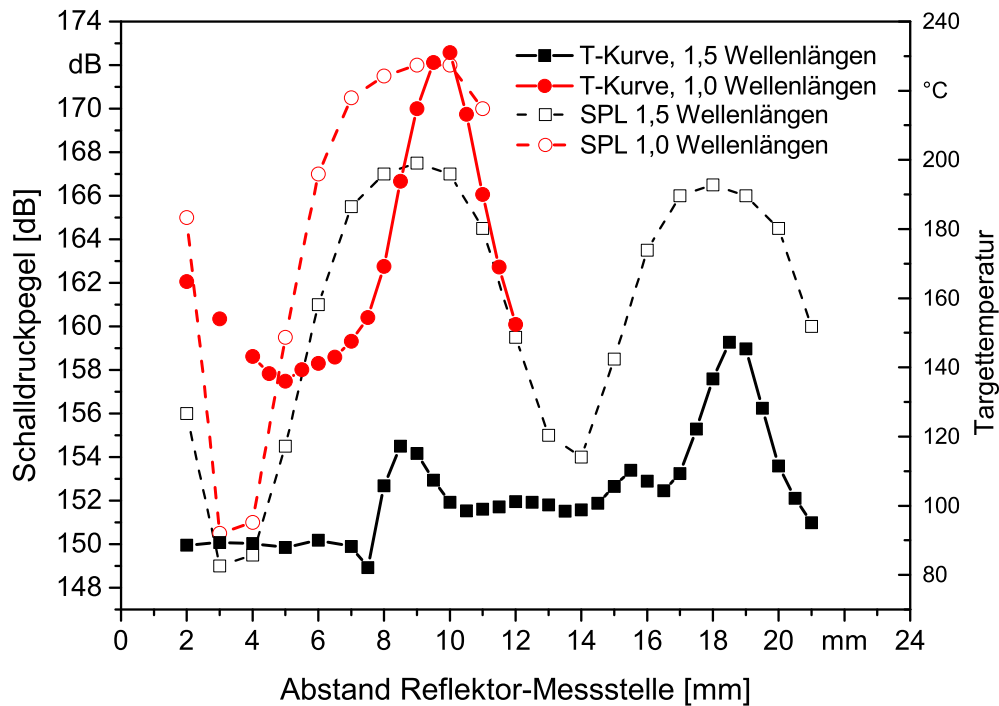


Abbildung 9: Ergebnisse der Messung des Schalldruckpegels entlang der Schallfeldachse und der Temperatur in einem Melaminharz-Schaumstoff-Zielkörper bei Verschiebung relativ zum Ultraschallstehwellenfeld.

Entsprechend kann im Hinblick auf die Zündversuche zusammengefasst werden, dass das Worst-Case-Szenario für eine Zündung bei Einkopplung des Ultraschalls in eine gasförmige Atmosphäre ein Ultraschallstehwellenfeld mit einem kurzen Resonanzabstand zwischen Schallquelle und Reflektor ist, in dem ein offenporiger Körper auf der Reflektoroberfläche befestigt ist, der die Energie der Schallwelle in Wärme umsetzt.

Als Zielkörpermaterial für die Zündversuche wird die Erdalkali-Silikat-Wolle verwendet, da sie in den Vorversuchen die höchsten Temperaturen erzielte. Der Melaminharz-Schaumstoff ist zwar fester, stabiler und leichter hinsichtlich seiner Abmessungen zu reproduzieren, oberhalb von 240°C beginnt sich dieser Stoff jedoch thermisch zu zersetzen, sodass er seine akustische Absorptionsfähigkeit verliert. Da Schwefelstaub unter den verwendeten Stäuben mit 250°C die niedrigste Zündtemperatur aufweist, ist dieser Schaumstoff für die Zündversuche ungeeignet.

3.3.2 Ergebnisse der Zündversuche

In Abbildung 10 ist der Verlauf von Schalldruckpegel und Zielkörpertemperatur bei Variation des Sonotroden-Reflektor-Abstandes nach Integration der Ultraschall-Erzeuger-Einheit in das Hartmann-Rohr dargestellt. Diese Messung erfolgte um nachzuprüfen, ob es durch die Wände des Hartmann-Rohres zu einer Behinderung des Stehwellenfeldes kommt. Es zeigte sich, dass wie in den Messungen außerhalb des Rohres nach Abbildung 9 die maximale Erwärmung bei Resonanzabstimmung auftritt, d. h. bei Abständen von $d = n \cdot \lambda/2$ zwischen Sonotrode und Reflektor. Bei einer Setzspannung von 100 mV und einer Distanz von 15 mm überlappt der Schalldruckpegel von (180 dB re. 20 μ Pa) mit der höchsten erzielten Temperatur von 450°C. Für die folgenden Zündversuche wurde deshalb diese Distanz verwendet und nur leicht variiert, um das Stehwellenfeld aufrecht zu erhalten.

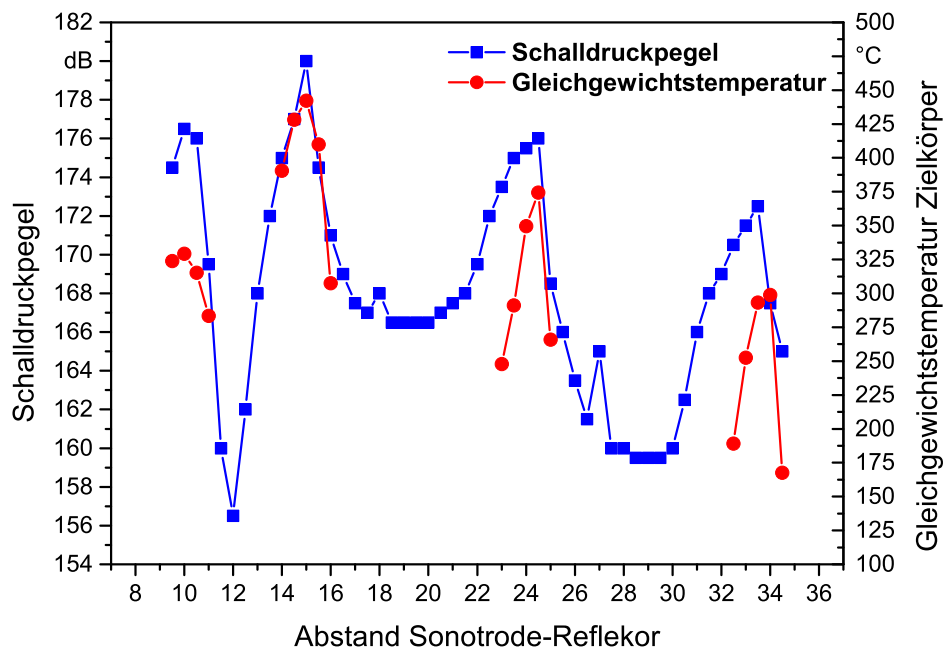


Abbildung 10: Ergebnisse der Schalldruckpegel- und Temperaturmessung im Hartmann-Rohr bei einer Setzspannung von 100 mV und Variation des Abstandes zwischen Sonotrode und Reflektor

Die Zündversuche ergaben Zündungen in Schwefelstaub oberhalb von 178 dB. Bei geringeren Schalldruckpegeln konnten keine Zündungen beobachtet werden. Dabei wurde es als Entzündung gewertet, wenn entweder der Druckan-

stieg zu einem Ansprechen der Druckentlastungsklappe und damit zur Inkrementierung des angeschlossenen Zählwerkes führte oder zu einer sichtbaren Flamme. Glimmen oder Glühen wurde nicht als Zündung gewertet. Die anderen verwendeten Stäube lieferten keine Zündungen. In den Zündversuchen mit Maisstärke und Calciumstearat konnten jedoch die Zündtemperaturen dieser Stäube überschritten werden, und die verwendeten Zielkörper wiesen Verbrennungsrückstände auf. Dies lässt darauf schließen, dass sie grundsätzlich in noch stärkeren Ultraschallfeldern zur Explosion gebracht werden könnten. Demgegenüber konnte für Magnesium- und Aluminiumstaub die jeweilige Zündtemperatur nicht erreicht werden.

Die Untersuchungen in Dampf-Luft-Gemischen lieferten nur für Schwefelkohlenstoff eine Zündung. Dazu waren jedoch Schalldruckpegel deutlich über 180 dB und Temperaturen über 400°C notwendig. Entsprechend werden die Worst-Case-Bedingungen durch die Verwendung von Schwefelstaub-Luft-Gemischen als explosionsfähiger Atmosphäre am besten adressiert.

Entsprechend der im vorigen Absatz getroffenen Definition für eine Zündung konnten drei Bereiche unterschieden werden. In dem Bereich ab 180 dB waren heftige Zündungen mit einem Ansprechen der Druckentlastung zu beobachten. Bei 179 dB traten nur Flammenerscheinungen auf. Bei 178 dB und darunter waren keine Zündungen nach der obigen Definition zu verzeichnen, lediglich ein Glimmen oder Glühen des Zielkörpers war zu erkennen.

In Abbildung 11 ist der Temperaturverlauf für die Zündversuche bei 180 dB (schwarze gestrichelte Linie) und 181 dB (rote durchgezogene Linie) gezeigt. In beiden Fällen kam es zu einer heftigen Reaktion, die zu einem Druckanstieg im Rohr und damit zu einem Ansprechen der Druckentlastungsklappe führte. Um die Ultraschallanlage nicht zu überlasten, wurde der Schalldruckpegel über die Setzspannung am Verstärkereingang stufenweise erhöht. Im Fall des Zündversuchs bei 180 dB erreichte der Zielkörper 20 s nach der letzten Erhöhung eine Gleichgewichtstemperatur von circa 420°C. Nach 50 s kam es zu einem scharfen Temperatursprung auf 490°C und direkt folgendem Einbruch der Temperatur, was als Maximum im Temperatur-Zeit-Diagramm erkennbar ist. Dieses Maximum fällt mit der beobachteten Zündung zusammen. Nach der Zündung fiel die Temperatur kurz unter die Gleichgewichtstemperatur. Diese wurde jedoch kurz darauf wieder erreicht. Nach circa 80 s wurde der Ultraschall abgeschaltet, was am Abfall der Temperatur zu erkennen ist.

Im Zündversuch mit 181 dB erfolgte der Temperaturanstieg auf die Gleichgewichtstemperatur nicht einheitlich. Trotz des höheren Schalldruckpegels wurde zudem eine geringere Gleichgewichtstemperatur mit dem Thermoelement gemessen (circa 360°C). Bei $t = 260$ s wurde der Staub aufgewirbelt, und es kam direkt darauf folgend zur Zündung, wiederum erkennbar an einem scharfen Maximum im Temperatur-Zeit-Diagramm. Die Zündung wurde erneut von einer heftigen Reaktion mit Auslösen der Druckentlastungsklappe begleitet. Die auch auf die Sonotrode einwirkende Druckwelle führte zu einem Abschalten der Sonotrode, weshalb die Temperatur direkt nach der Zündung auf Raumtemperatur abfiel.

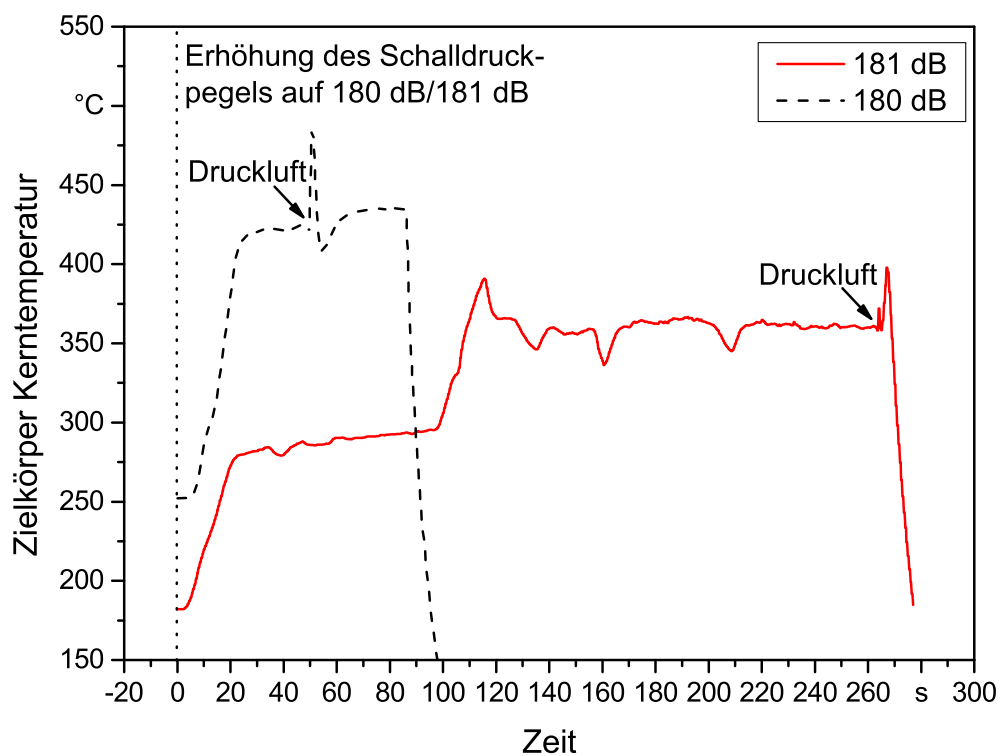


Abbildung 11: Temperatur-Zeit-Diagramm für die Zündversuche bei 180 dB und 181 dB (re. 20 μ Pa).

Der scharfe Temperaturanstieg in beiden Kurven zeigt eine schnelle exotherme Reaktion an, die die Zündung des Staub-Luft-Gemisches auslöste. Zudem zeigen die Temperaturkurven in Abbildung 11, dass es mindestens 5 s dauerte, den Zielkörper über die Zündtemperatur des Schwefelstaubes (250°C) zu erwärmen.

Nach den erfolgreichen Zündversuchen wurden die Zielkörper unter einem Mikroskop auf Staubreste untersucht. Es ließen sich keine Rückstände erkennen. Es scheint, dass der Staub im Fall einer Zündung vollständig an der Faseroberfläche der erwärmten Erdalkali-Silikat-Wolle verbrennt.

Abbildung 12 zeigt die Zündversuche bei 179 dB. Jedem Kurvenverlauf ist die verwendete Menge an Schwefelstaub und die sichtbare Verbrennungsart zugeordnet. Bis auf die Kurve mit 0,4 g/l Schwefel durchlaufen alle Kurven ein scharfes Maximum, was auf eine exotherme Reaktion hinweist. Vor dem Aufwirbeln des Staubs hatten die verwendeten Zielkörper Kerntemperaturen von 300°C bis 320°C erreicht. Nur im Versuch mit dem 0,4 g/l Schwefel wurden 300°C vor Aufwirbeln nicht überschritten. In den Versuchen mit Temperaturen über 300°C waren deutliche Flammenerscheinungen sichtbar. Im Fall von 0,4 g/l Schwefel kam es nur zu einem Glühen von Staubpartikeln, die sich auf dem Zielkörper absetzten, eine Flamme ließ sich nicht erkennen. Entsprechend diesen Versuchen muss eine Zielkörpertemperatur von 300°C überschritten werden, damit es zu einer Zündung der Schwefelstaub-Luft-Atmosphäre kommen kann.

In den Versuchen bei 178 dB und darunter konnte keine Zündung beobachtet werden. Um diese Grenze abzusichern, wurden neun Zündversuche bei diesem Schalldruckpegel durchgeführt. Die zugehörigen Temperaturkurven sind in Abbildung 13 A bis C dargestellt und lassen sich in drei unterschiedliche Verläufe unterteilen.

In den Kurvenverläufen von Abbildung 13 A liegt die Temperatur vor dem Aufwirbeln unter der ermittelten Zündtemperatur des verwendeten Schwefelstaubes, sodass eine Zündung nicht möglich war. Sie zeigen zudem einen Temperaturabfall kurz nachdem der Staub über den Zerstäuberpilz aufgewirbelt wurde. Nach einigen Sekunden steigt die Temperatur jedoch wieder an und bleibt dann auf ähnlichem Niveau, wie vor dem Aufwirbeln. Der Staub hat demzufolge die Absorptionseigenschaften des Zielkörpers nicht wesentlich verändert. Der kurzzeitige Temperaturabfall kann durch den Wärmeübergang vom Zielkörpermaterial an den Staub erklärt werden.

In Abbildung 13 B hatten die Zielkörper vor Auslösen des Zerstäuberpilzes in allen Fällen Temperaturen zwischen 260°C und 300°C und damit über der Zündtemperatur des Schwefels. Zudem ist ihnen jedoch gemein, dass der Zielkörper sich nach dem Temperaturrückgang durch die Staubwolke nicht wieder erwärmte, sondern dass die Temperatur immer weiter abnahm und

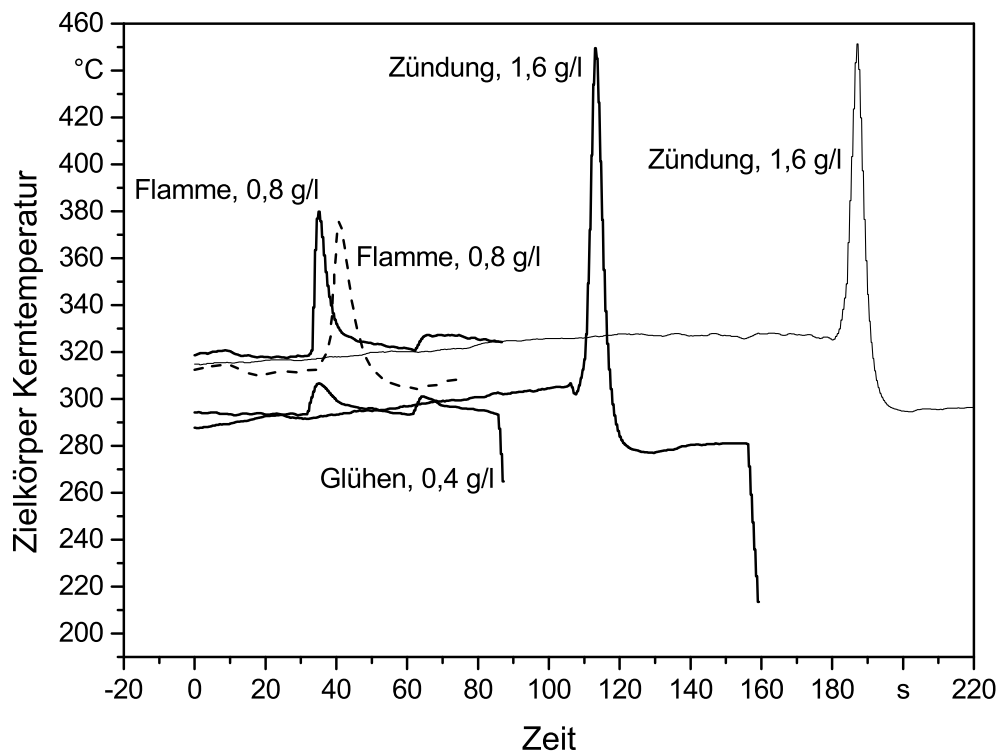


Abbildung 12: Temperatur-Zeit-Diagramm für die Zündversuche bei 179 dB (re. 20 μ Pa)

dabei die Zündtemperatur unterschritt. Dies lässt sich damit erklären, dass der Staub die Absorptionseigenschaften des Zielkörpers verschlechterte.

In Abbildung 13 C ist dagegen ein deutlicher Anstieg der Temperatur nach Auslösen der Staubwolke zu verzeichnen. Im Fall des Zündversuchs mit 1,6 g/l stieg die Temperatur innerhalb von 6 s von 294°C auf 436°C. Nach dem zweiten Aufwirbeln des Staubs wurde ein zweites Temperaturmaximum erreicht, das allerdings deutlich weniger ausgeprägt war. Eine Flamme konnte jedoch nicht wahrgenommen werden. Für die Kurve mit 1,0 g/l Schwefel verlief der Temperaturanstieg wesentlich langsamer, ausgehend von 283°C auf 317°C in 42 s. Der Anstieg lässt sich mit einer exothermen Reaktion erklären, die zu langsam verlief, um zu einer Zündung des Staub-Luft-Gemisches zu führen. Dafür spricht auch, dass an den Fasern des Zielkörpers geschmolzene Schwefelrückstände zu erkennen waren. Im Gegensatz zu den Zündversuchen oberhalb von 178 dB kam es in diesem Fall nicht zu einer vollständigen Verbrennung des Schwefels.

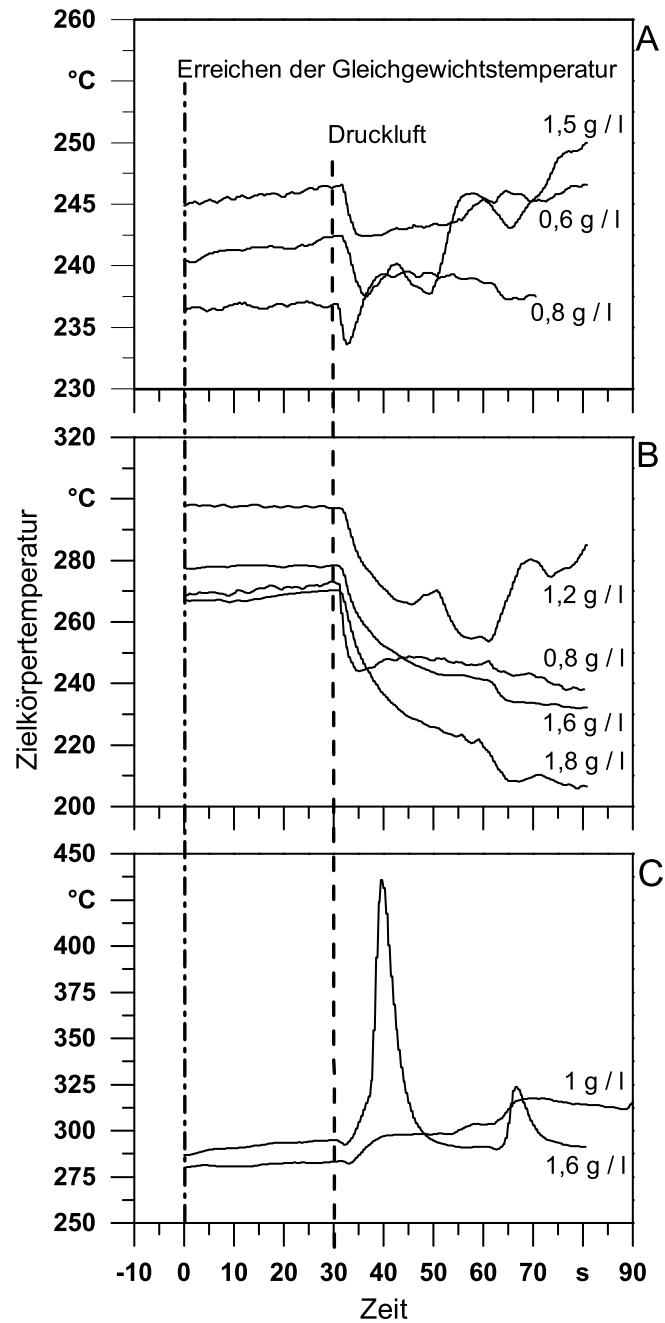


Abbildung 13: Temperatur-Zeit-Diagramm für die Zündversuche bei 178 dB (re. 20 μ Pa). Es traten keine Zündungen auf. Die Abbildungen A - C unterteilen die Temperaturkurven in 3 unterschiedliche Verläufe

Abbildung 14 fasst die Zündversuche als Zündungen bzw. Nichtzündungen in Abhängigkeit von Zielkörpertemperatur und Schalldruckpegel zusammen. Es zeigt nochmals, dass Zündungen erst oberhalb von 178 dB und 300°C auftraten. Bei 178 dB lag die Temperatur im Kern des Zielkörpers im Mittel bei $266^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$. Die Graphik enthält zudem eine Wahrscheinlichkeitsfunktion hinsichtlich des Schalldruckpegels auf das Ereignis Zündung bzw. Nichtzündung nach einer logistischen Regression. Daraus folgt eine scharfe Schwelle zwischen diesen beiden Ereignissen bei 178 dB. Für die logistische Regression ist eine höhere Stichprobe erforderlich, sodass die Aussagekraft dieser Wahrscheinlichkeitsfunktion eingeschränkt ist. Eine größere Zahl von Zündversuchen war innerhalb der Versuchsreihe auf Grund der Beschädigung der Anlage jedoch nicht möglich.

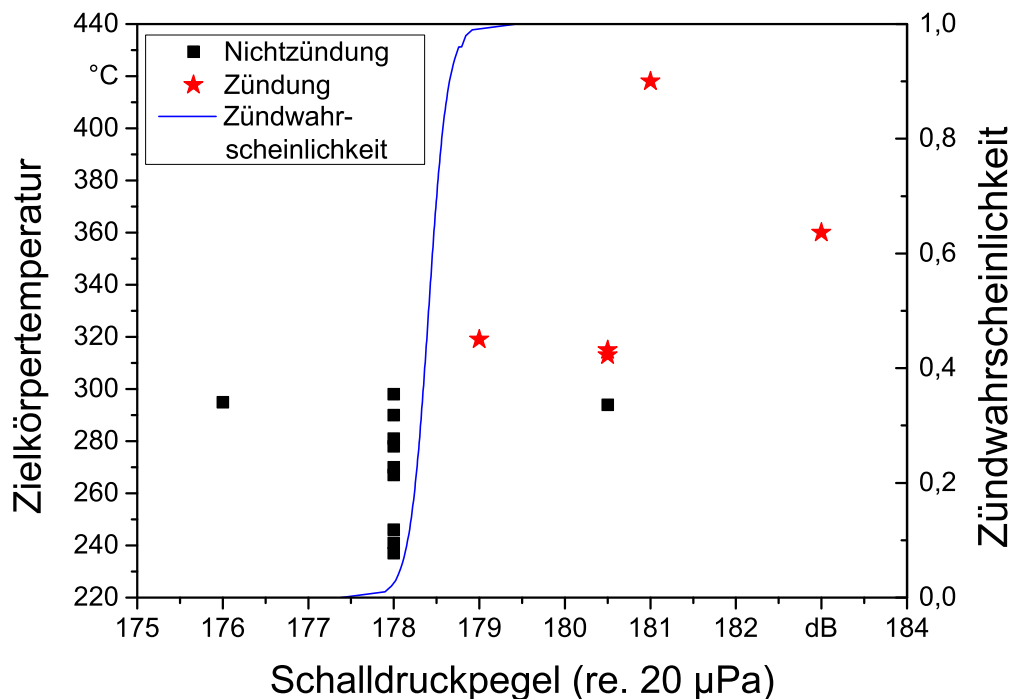


Abbildung 14: Ergebnisse der Zündversuche hinsichtlich Zündung bzw. Nichtzündung von Schwefelstaub in Abhängigkeit von Schalldruckpegel und resultierender Zielkörpertemperatur

Die Reproduzierungsuntersuchungen hinsichtlich der Zündwirksamkeit gegenüber Schwefel lieferten eine etwas höhere Zündgrenze von 181 dB. Dies liegt jedoch im Rahmen der Messunsicherheit der Schalldruckpegelmessung von ± 2 dB. Die Abbildung 15 stellt die Ergebnisse der beiden Serien gegenüber.

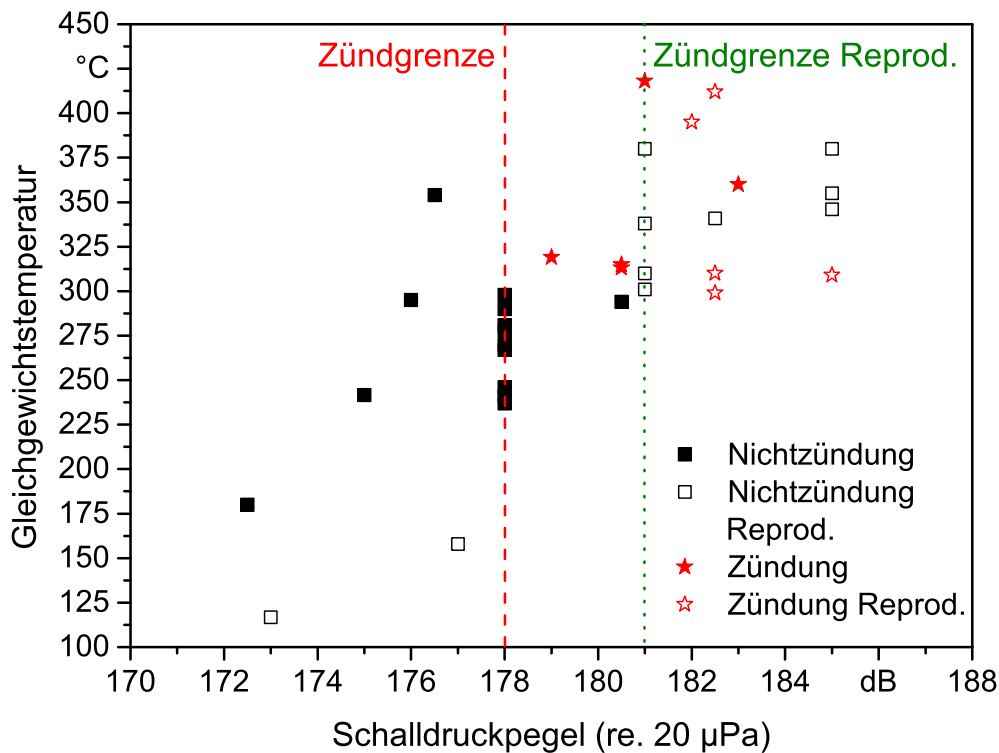


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Zündversuche und Reproduzierbarkeitsuntersuchungen (Reprod.)

3.4 Diskussion der Zündwirksamkeit in Gasen, Dämpfen und Stäuben

Allgemein

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist, mit Luft-Ultraschall explosionsfähige Atmosphären zu zünden, wenn ein akustisch absorbierender Körper einem Ultraschallfeld mit hohen Schalldruckpegeln über 178 dB (re. 20 μ Pa) ausgesetzt ist. Bei diesen Pegeln nahm in den experimentellen Untersuchungen nach Abschnitt 3.3 die verwendete Erdalkali-Silikat-Wolle Temperaturen über 300 °C an, was zur Zündung von Schwefelstaub-Luft-Gemisch mit einer Zündtemperatur von 250 °C führte. Unterhalb von 178 dB erreichten die Zielkörper nur Temperaturen, die die nach Norm bestimmte Zündtemperatur um weniger als 50 °C überschritten. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, kann die Zündtemperatur in einer beliebigen Anordnung deutlich von der nach Norm bestimmten abweichen, da sie u.a. von der Geometrie der

Anordnung, der Brennstoff-Konzentration und Strömungsgeschwindigkeiten abhängt. In den durchgeführten Zündversuchen setzt sich die Oberfläche des Zielkörpers aus seinen dünnen Fasern zusammen. Dabei weisen die einzelnen Fasern wegen ihrer geringen Masse eine niedrige Wärmekapazität auf. Die Faserstruktur wirkt somit wie eine Vielzahl von Hot-Spots, die Zusammen die Energie aufbringen müssen, um die Staub-Luft-Atmosphäre zu zünden. Durch akustische Konvektion und Wärmekonvektion ist die Expositionsdauer der Staubpartikel an den Fasern sehr kurz. In Bezug auf die verwendeten Dämpfe ist davon auszugehen, dass alle Fasern mit dem Dampf-Luft-Gemisch in Kontakt treten, die Kontaktzeit der Stäube im Vergleich jedoch auf Grund der größeren Masse der Staubpartikel länger ist, was die Zündung begünstigt. Die Ergebnisse dieser in einer ersten Serie durchgeführten Zündversuche ließen sich durch eine zweite Serie reproduzieren. Die dabei gefundene Zündgrenze lag mit 181 dB (re. 20 μ Pa) innerhalb der Messunsicherheit des Schalldruckpegels von ± 2 dB.

Bewertung der Worst-Case Bedingungen und Zündversuche

Die Temperaturmessung erfolgte mittels Thermoelementen, deren Messstellen jeweils im Zentrum der verwendeten Zielkörper positioniert wurden, während die Zündung an der heißen Oberfläche dieser Körper erfolgte. Diese Positionierung ergab sich aus der Überlegung, dass die Ultraschallwelle im Inneren des Materials absorbiert wird und somit dort auch die höchste Temperatur zu erwarten wäre. Zur Überprüfung wurde mit einem zweiten Thermoelement die Temperatur auf der Zielkörperoberfläche gemessen. Da das faserige Material jedoch instabil und flexibel ist, ließen sich die Thermoelemente beim Austausch des Zielkörpers nicht exakt an der gleichen Stelle positionieren. Der Vergleich der Messungen von außen und innen angebrachtem Thermoelement lieferte dabei kein eindeutiges Ergebnis. In einigen Fällen lag die gemessene Außentemperatur über der inneren, in anderen Fällen umgekehrt. Der Unterschied der beiden Temperaturmessungen lag dabei zwischen 1°C bis 40°C. Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass der instabile Zielkörper durch auf ihn wirkende Kräfte im Schallfeld verändert wurde, z. B. ausfranst, sich verdichtete oder auch zerfaserte.

Trotz der Unsicherheit hinsichtlich der Temperaturmessung zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen Überlegungen nach Abschnitt 3.1 und den experimentellen Ergebnissen. So konnte einerseits experimentell gezeigt werden, dass die Erwärmungsrate im Schalldruckbauch des Ultraschallstehwellenfeldes erheblich stärker ausfällt als an abweichenden Positionen. Auch zeigte sich, dass eine für Zündungen kritische Erwärmung

nur durch die Absorption der akustischen Energie in einem Festkörper hoher Porosität erzielt werden kann. Die Zündversuche zeigten zudem, dass sich nur sehr leicht entzündliche Gemische mit niedriger Zündtemperatur entzünden lassen. Auf den ersten Blick ist es überraschend, dass sich Dämpfe schlechter entzünden ließen als Schwefelstaub, obwohl z. B. Schwefelkohlenstoff und Diethylether niedrigere Normzündtemperaturen aufweisen. Die Tatsache, dass sich Schwefelkohlenstoff erst oberhalb von 400°C entzünden ließ, zeigt die Ineffektivität der Zündquelle Ultraschall gegenüber Gasen und Dämpfen. Dies lässt sich jedoch dadurch erklären, dass in starken Ultraschallfeldern heftige Turbulenzen auftreten, sodass die Kontaktzeiten zwischen Brennstoff-Luft-Gemisch und Zielkörper gering sind. Dieser Effekt ist jedoch bei Stäuben wegen ihrer Massenträgheit geringer. Zudem können sie im Gegensatz zu Dämpfen und Gasen nur bedingt durch den feinporigen und faserigen Zielkörper hindurch strömen, sondern bleiben an den erwärmten Fasern haften.

Es stellt sich die Frage, ob trotz der geringen Absorption durch die explosionsfähige Atmosphäre eine direkte Zündung im Ultraschallfeld möglich wäre, wenn der Schalldruckpegel stark genug erhöht wird. Der Erzeugung von Ultraschall in gasförmigen Medien sind jedoch technische Grenzen gesetzt. Um die in das gasförmige Medium eingekoppelte Leistung zu erhöhen, könnte die schallabstrahlende Fläche der Sonotrode vergrößert werden. Dies wird bei den Stufenhörnern für Leistungs-Ultraschallanwendungen in Luft nach GALLEGOS-JUAREZ [41] ausgenutzt. Entsprechend NYBORG [40] ist aber die Intensität für die Erwärmung maßgeblich (vgl. Abschnitt 3.1), die durch Vergrößerung einer planaren Strahleroberfläche jedoch nicht beeinflusst wird. Durch Fokussierung mittels einer konkav geformten Strahlerfläche kann dies dennoch erreicht werden. Für eine scharfe Fokussierung müsste eine höhere Frequenz bzw. kleinere Wellenlänge verwendet werden. Dann müssten aber auch die Abmessungen der Komponenten zur Schallerzeugung (piezoelektrischer Wandler, Booster, Sonotrode) verkleinert werden [51], während sie trotzdem hohe elektrische bzw. mechanische Spannungen aushalten müssten. Zudem würden höhere Schalldruckpegel auch zu immer stärkeren Turbulenzen führen, die der Zündung entgegenstehen.

3.5 Fazit zur Zündwirksamkeit in Gasen, Dämpfen und Stäuben

Es hat sich gezeigt, dass direkt in explosionsfähige Atmosphären aus Gasen, Dämpfen und Stäuben eingekoppelter Ultraschall zündwirksam werden kann. Allerdings sind dazu extreme Bedingungen erforderlich, wie sie in den bisher bekannten industriellen Anwendungen nicht auftreten. So müssen für eine Zündung gleichzeitig ein extrem hoher Schalldruckpegel, ein Ultraschall absorbierender Körper und eine leicht entzündliche explosionsfähige Atmosphäre zusammenkommen. Zusätzlich muss der absorbierende Körper im Schalldruckbauch eines Ultraschallstehwellenfeldes befestigt sein. Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse ist es sinnvoll, die in Kapitel 2.2 zitierten derzeit gültigen Anforderungen aufzuweiten. Durch Übergang von der Intensität als Grenzwert zu einem Schalldruckpegel könnte zudem der Nachweis der Einhaltung des Grenzwertes vereinfacht werden. In Kapitel 6 ist deshalb ein Vorschlag für eine Neufassung der Anforderungen der DIN EN 1127-1:2011 [1] bzw. der TRBS 2152-1 Teil 3 [2] verfasst.

4 Zündwirksamkeit von Ultraschall in Flüssigkeiten bei MHz-Frequenzen

Hinsichtlich der Zündwirksamkeit von Ultraschall bei Einkopplung der Ultraschallwelle in ein flüssiges Medium werden zwei grundsätzlich verschiedene Fälle unterschieden: Im ersten Fall wird betrachtet, ob es möglich ist, dass der Ultraschall eine explosionsfähige Atmosphäre oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche zünden könnte. Dazu muss die Schallenergie aus der Flüssigkeit in die darüber befindliche Gasphase übertragen werden. Der zweite Fall betrifft Ultraschallbäder, in denen es zu starker akustischer Kavitation kommt. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Kavitationsblasen z.B. in brennbaren Flüssigkeiten gezündet werden können und ob eine solche Zündung unter der Flüssigkeitsoberfläche in eine explosionsfähige Atmosphäre darüber durchschlagen kann. Der erste Fall wird im folgenden Abschnitt 4.1 betrachtet. Dem zweiten Fall ist der Abschnitt 5 gewidmet.

4.1 Theoretische Überlegungen zur Worst-Case-Situation an der Flüssigkeitsoberfläche von Ultraschallbädern

Wie im vorausgegangenen Kapitel zur Zündwirksamkeit von Ultraschall bei direkter Einkopplung der Schallwelle in ein gasförmiges Medium sollen in diesem Abschnitt theoretische Überlegungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche eines Ultraschallbades den experimentellen Untersuchungen voraus gestellt werden. Auch hier ist es das Ziel dieser Überlegungen, ein Worst-Case-Szenario zu entwerfen, dass eine Zündung provozieren könnte.

Um hohe Intensitäten an der Flüssigkeitsoberfläche zu erzielen, wird hoch fokussierter Ultraschall mit Frequenzen im MHz-Bereich verwendet. In diesem Frequenzbereich liegt die Wellenlänge in Wasser in der Größenordnung von 1 mm. Dadurch ist es möglich, den Ultraschall mit einem konkav geformten Ultraschallwandler scharf zu fokussieren, wie sich aus Gleichung 26 in Abschnitt 2.3.4 ergibt. Zudem steigt der akustische Absorptionskoeffizient mit der Frequenz (vgl. Abschnitt 2.3.3), sodass die akustische Energie bei MHz-Frequenzen effektiver in Wärme umgewandelt wird als bei niedrigeren Frequenzen.

Im kHz-Bereich tritt darüber hinaus starke Kavitation auf, deren Anregung einen Großteil der Energie verbraucht. Außerdem bewirken die sich bildenden Kavitationsblasen eine Verringerung der Dichte des Ausbreitungsmediums,

sodass die Leistung, die in die Flüssigkeit übertragen werden kann, durch diese begrenzt ist. Schließlich wird das Schallfeld an den Kavitationsblasen gestreut. Im MHz-Bereich sind dagegen höhere Amplituden zur Anregung von Kavitationsblasen erforderlich und die Blasendurchmesser sind kleiner (typischer Radius $\leq 3 \mu\text{m}$ bei 1 MHz [52]). Dadurch ist ihr Einfluss vernachlässigbar.

Für eine Zündung müsste der Fokus des Ultraschallwandlers jenseits der Phasengrenze flüssig-gasförmig platziert werden. Da das Impedanzverhältnis der Flüssigkeit Z_{Fl} zur Gas- bzw. Dampfphase Z_D jedoch in der Größenordnung von 0,0001 liegt ($Z_D \approx 100 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ und $Z_{Fl} \approx 1000 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}$ [53]) ergibt sich der Reflexionskoeffizient mit Gleichung 17 zu $R_p = 0,99$. Entsprechend werden 99% der Schallwelle an der Phasengrenze reflektiert. Zudem bewirkt der akustische Schallstrahlungsdruck eine Aufwölbung der Flüssigkeitsoberfläche. Bei hohen Intensitäten wird die Flüssigkeitsoberfläche in Tropfen zerprüht.

Befindet sich jedoch ein Körper an der Flüssigkeitsoberfläche, dessen akustische Impedanz in der Größenordnung derer der Flüssigkeit liegt, sodass die Schallwelle in das Material transmittiert wird, könnte dieser Körper die Schallenergie in Wärme umwandeln und es dann zu einer Zündung an seiner heißen Oberfläche kommen. In dieser Hinsicht wurde eine ähnliche Vorgehensweise wie bei der Untersuchung von Zündungen durch optische Strahlung gewählt [54, 55].

Damit der beschallte Zielkörper sich jedoch hinreichend erwärmen kann, um eine Zündung auszulösen, muss er neben der bereits angeführten Bedingung zu seiner Impedanz noch weitere Voraussetzungen erfüllen: Der Körper muss die in ihn transmittierte akustische Energie absorbieren. Die Schwächung erfolgt entsprechend Gleichung 1 mit $e^{-\alpha x}$, d. h. das Material muss zum einen einen hohen Absorptionskoeffizienten α aufweisen, zum anderen muss es in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle eine Dicke von mindestens einer Wellenlänge aufweisen, um die Schallwelle signifikant zu schwächen. Außerdem muss er breit genug sein, um das Zersprühen der Flüssigkeit durch den Schallstrahlungsdruck zu verhindern. Weiterhin muss das Material des Zielkörpers temperaturbeständig genug sein, um sich auf Temperaturen oberhalb der Zündtemperaturen von Gas-Luft- bzw. Dampf-Luft-Atmosphären erwärmen zu können. Letztlich ist es vorteilhaft, wenn das Zielkörpermaterial eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und sich entsprechend Wärme akkumulieren kann, anstatt in die Flüssigkeit abgeleitet zu werden.

Diese geforderten Eigenschaften schränken die Bandbreite geeigneter Materialien bereits deutlich ein. So scheiden Metalle (ausgenommen Alkalimetalle) und Keramiken aus, denn obwohl sie einerseits ausreichend temperaturbeständig sind, ist ihre akustische Impedanzen im Bereich von 25 MNs/m³ bis 50 MNs/m³ [53, 56]. Dagegen weisen Flüssigkeiten Impedanzen im Bereich von 0,5 MNs/m³ bis 3 MNs/m³ [17, 23, 53, 56] auf, beispielsweise Pentan 0,6 MNs/m³, Wasser und Schwefelkohlenstoff 1,5 MNs/m³ oder Glyzerin 2,5 MNs/m³. Entsprechend wird der überwiegende Teil der Schallwelle an der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Festkörper reflektiert. Kunststoffe haben dagegen akustische Impedanzen im Bereich von 2,5 MNs/m³ bis 4 MNs/m³ [53, 56]. Somit wird ein Großteil der Schallwelle in den Kunststoff transmittiert. Erfahrungsgemäß schmelzen allerdings viele Kunststoffe im Fokus eines fokussierenden Ultraschallwandlers. Da die Schmelztemperaturen von Kunststoffen wie Polymethylmethacrylat (PMMA) um 150°C liegen, sind sie als Zielkörper für Zündversuche nicht geeignet. Allerdings gibt es Kunststoffe für Hochtemperaturanwendungen, z. B. für elektrische Isolationen, die mehrere 100°C aushalten. Diese könnten zur Ausbildung von heißen Oberflächen bei Beschallung mit fokussiertem Ultraschall geeignet sein.

Um eine Zündung an der heißen Oberfläche des an der Flüssigkeitsoberfläche fixierten Zielkörpers zu entfachen, ist es im Rahmen der Worst-Case-Untersuchung sinnvoll, eine explosionsfähige Atmosphäre mit niedriger Zündtemperatur zu verwenden. In Abschnitt 2.1 wurde die Einteilung von brennbaren Gasen und Dämpfen in Temperaturklassen mit repräsentativen Vertretern dargestellt. Entsprechend können die Zündversuche mit diesen Repräsentanten durchgeführt werden, um festzustellen, ob eine Zündung nach dem beschriebenen Mechanismus überhaupt möglich ist und welche Grenzbedingungen überschritten werden müssen. Neben diesen Eigenschaften muss sichergestellt sein, dass der Zielkörper im Fokus der Ultraschallquelle verbleibt. Er muss also einerseits gegen Absinken gesichert sein, wenn seine Dichte größer ist als die der Flüssigkeit. Andererseits muss er so fest sitzen, dass er durch den akustischen Schallstrahlungsdruck nicht aus dem Fokus getrieben wird. In Abbildung 16 ist die grundlegende Idee des Worst-Case-Szenario dargestellt.

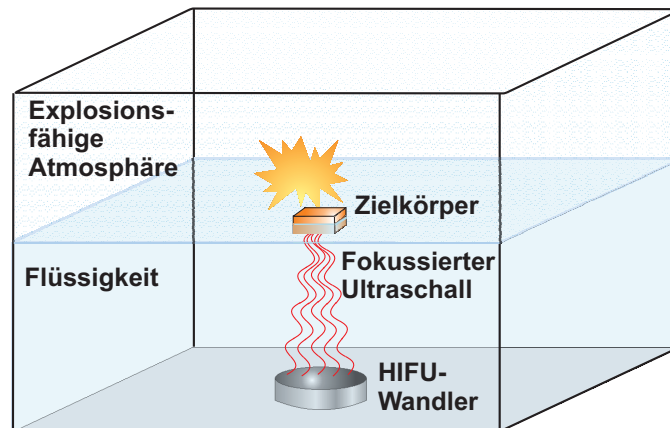


Abbildung 16: Worst-Case-Situation für die Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche eines Ultraschallbades.

4.2 Versuchsanordnung, Messtechnik und Durchführung der Zündversuche mit fokussiertem Ultraschall im MHz-Bereich

4.2.1 Versuchsanordnung

In Abschnitt 4.1 wurde ein Szenario entwickelt, dessen Bedingungen eine Zündung durch fokussierten Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche eines Ultraschallbades provozieren könnten. Zur Durchführung von Zündversuchen musste dieses Worst-Case-Szenario in eine Versuchsanordnung umgesetzt werden, die diesen Bedingungen entsprach. Sie ist in Abbildung 17 dargestellt.

Als Ultraschallquelle wurde ein hochintensiver fokussierender Ultraschall-Wandler (HIFU-Wandler) verwendet (SonicConcepts, Model H-101, 1,1 MHz), der höhenverstellbar in das Bad eingebaut wurde. Der HIFU-Wandler wurde mit einem Funktionsgenerator angesteuert (Tektronix AFG 3101), dessen Signal über einen Leistungsverstärker (AR Model 500A250A, 500 W, 10 kHz - 250 MHz) verstärkt wurde. Um eine Störung des Ultraschallwandlers während der Sendephase durch Reflexionen zu vermeiden, wurde der HIFU-Wandler im Burst-Modus mit 90 Zyklen und Intervall dauern von 246 μs betrieben, sodass die reflektierte Welle abgeklungen war, wenn der nächste Zyklus gesendet wurde.

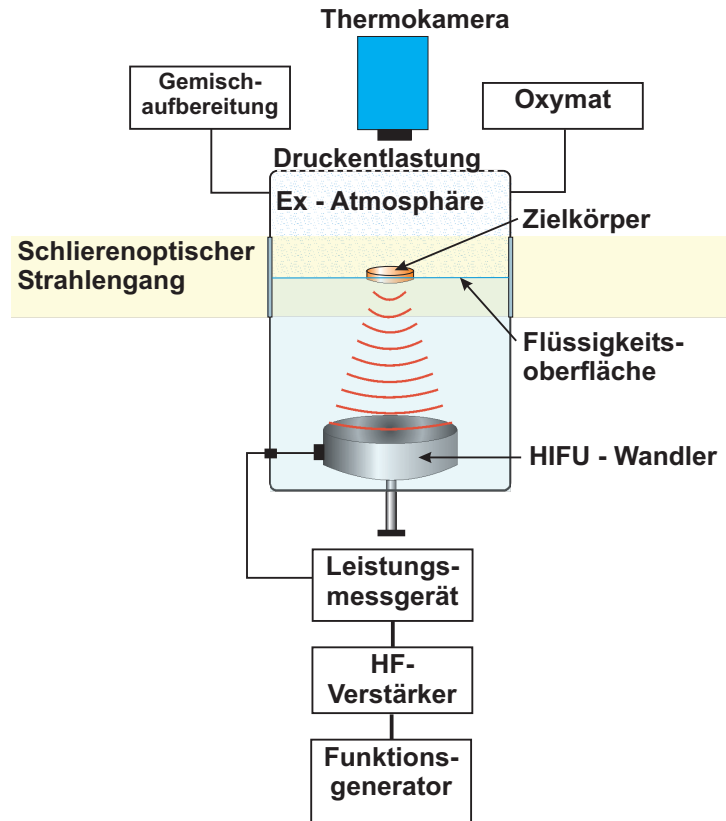


Abbildung 17: Versuchsanordnung für Zündversuche an der Flüssigkeitsoberfläche eines Ultraschallbades.

4.2.2 Auswahl des Zielkörpermateri als

Für die Umsetzung der Worst-Case-Bedingungen in einen Versuchsaufbau für Zündversuche war die Auswahl eines geeigneten Zielkörpermateri als, das die akustische Energie in Wärme umsetzen und dabei eine hinreichend heiße Oberfläche ausbilden könnte, entscheidend. Entsprechend der Überlegungen nach Abschnitt 4.1 wurden mit Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polyetheretherketon (PEEK) zwei Kunststoffe ausgewählt. Die Schallgeschwindigkeiten wurden zu $c_{PEEK} = 2574,9 \text{ m/s} \pm 20,5 \text{ m/s}$ und $c_{PMMA} = 2777,8 \text{ m/s} \pm 18,6 \text{ m/s}$ bei $19,5^\circ\text{C}$ gemessen. Die Dichte des PEEK Körpers wurde zu $1,38 \text{ g/cm}^3$ bestimmt, woraus eine akustische Impedanz von $3,6 \text{ MNs/m}^3$ folgt. Für den PMMA-Körper ergab sich für die Dichte $1,18 \text{ g/cm}^3$ und daraus eine akustische Impedanz von $3,3 \text{ MNs/m}^3$. Zum Vergleich wurden zudem Zielkörper aus Gips und porösem Graphit verwendet und ihre Temperaturentwicklung unter Einfluss des fokussierten Ultraschalls untersucht, da ihre akustische Impedanz nahe der von Wasser ($1,5 \text{ MNs/m}^3$) liegt:

Nach DEUTSCH [53] liegt sie für Gips bei $2,63 \text{ MNs/m}^3$ und für Graphit bei $1,7 \text{ MNs/m}^3$. Die Zielkörper sind in Abbildung 18 a) dargestellt. Es handelte sich um zylindrische Scheiben mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 10 mm. Abbildung 18 b) zeigt einen aufgeschnittenen Zielkörper aus PEEK nach der Beschallung im Fokus des HIFU. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Material im Inneren thermisch zersetzt hat, während es an der Oberfläche weitgehend intakt geblieben ist. Dieser Effekt ist auch für einen Zielkörper aus PMMA zu erkennen (Abbildung 18 c)), setzt aber bei ihm wegen seines niedrigeren Schmelzpunktes schon bei sehr viel geringeren Leistungen ein. Die thermische Zersetzung hat zur Folge, dass sich die Absorptionseigenschaften des Zielkörpers verschlechtern und die Schallwelle gestreut wird. Dies wirkt sich wiederum negativ auf die Fokussierbarkeit des Ultraschalls im Zielkörpermaterial aus.



Abbildung 18: Zielkörper der Vorversuche: (a) Zielkörper aus Gips, PEEK, PMMA and Graphit; (b) Aufgeschnittener PEEK Körper nach Beschallung; (c) PMMA Zielkörper nach Beschallung.

Zur Messung der Temperaturentwicklung in den Zielkörpern bei Beschallung waren sie jeweils mit einem Thermoelement (Typ K) bestückt. Dazu wurde zentrisch eine 5 mm tiefe Senkbohrung eingelassen, in die das Thermoelement hineingesteckt werden konnte. Der jeweilige Zielkörper wurde dann unter Wasser gegenüber des HIFU-Wandlers in einem Abstand größer als seine Brennweite befestigt. Nach Einschalten des Ultraschalls wurde der Abstand in 0,5 mm Schritten verkleinert. Für jeden Schritt wurde eine Minute lang die Temperatur gemessen. Nach dieser Zeit hatte sich stets eine nicht weiter ansteigende Gleichgewichtstemperatur eingestellt, sodass sich ein stufenförmiger Temperaturverlauf ergab. Diese Verläufe sind für jedes Material bei einer akustischen Leistung von 5,2 W beispielhaft in Abbildung 19 aufgezeichnet. Darin ist zu erkennen, dass die Kunststoffe sich trotz der Kühlung durch das umgebende Wasser deutlich erwärmen. Für Gips und Graphit war dagegen kaum eine Temperaturerhöhung feststellbar. Folglich eignet sich PEEK wegen seiner höheren Temperaturbeständigkeit von den untersuchten Materialien am besten für die Zündversuche. Da die Schmelztemperatur

von PMMA bei circa 150°C liegt und damit nur die Normzündtemperatur von Schwefelkohlenstoff überschreitet, wurde dieses Material nicht weiter für Zündversuche in Betracht gezogen [50].

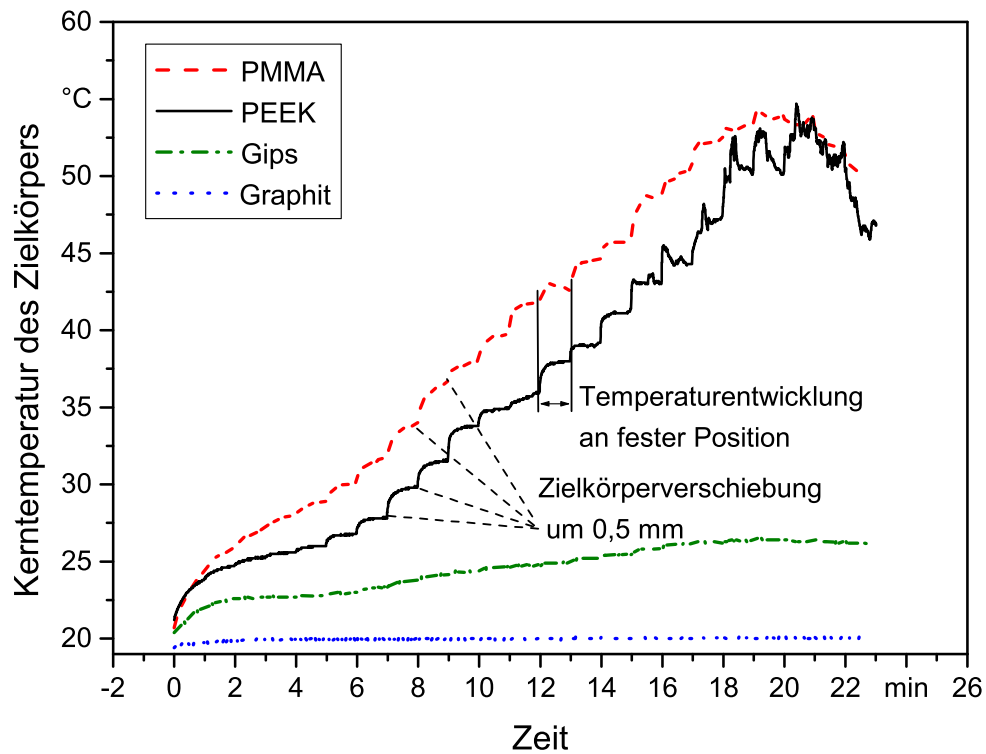


Abbildung 19: Temperaturentwicklung in unterschiedlichen Zielkörpermaterien bei Beschallung und Verschiebung des Zielkörpers relativ zum HIFU-Wandler.

4.2.3 Verwendete Messtechnik und Kalibrierung

Die Konzentration des jeweilig verwendeten Brennstoffs wurde wie bei den Untersuchungen mit Dämpfen nach Abschnitt 3.2 mit Hilfe eines paramagnetischen Sauerstoffanalysators (Siemens Oxymat 6F) bestimmt. Für die Zündversuche ist das Versuchsgefäß in diesem Fall jedoch mit Wasser gefüllt, sodass die Feuchtigkeit bei der Messung berücksichtigt werden muss. Die Feuchtigkeit verringert dabei als eine Art Begleitgas die Sauerstoffkonzentration des Startwertes zu $c_{0,f} = 20,45\%$ [57].

Um die Vorgänge im Versuchsgefäß zu überwachen wurden wie in den Zünd-

versuchen in Kapitel 3 eine Hochgeschwindigkeitskamera und ein schlieren-optischer Strahlengang verwendet. Für die Messung der Temperatur der Zielkörperoberfläche wurde eine Thermokamera verwendet. Dazu war in weiteren Vorversuchen im Rahmen der Arbeit von MEYER [57] der Emissionsgrad des PEEK zu 0,8 bestimmt worden. In dem Bereich von 20°C bis 500°C blieb er konstant. Dieser Wert steht in Übereinstimmung mit Literaturwerten für Kunststoffe [58, 59].

Die zeitlich gemittelte elektrische Eingangsleistung in den HIFU-Wandler wurde mit einem elektrischen Leistungsmesser bestimmt. Über eine akustische Strahlungskraftwaage war zuvor das Verhältnis von akustischer Ausgangsleistung zu elektrischer Eingangsleistung für eine Frequenz von 1,1 MHz zu 0,86 bestimmt worden. Für die 3. Harmonische des HIFU-Wandlers ergab dieses Verhältnis 0,56. Diese Verhältnisse sind in Abbildung 20 a) aufgetragen. Die Messunsicherheit für die Leistungsmessung lag dabei bei 2% ($k=1$). Weiterhin wurde mit einem Nadelhydrophon die Brennweite des HIFU-Wandlers zu 63,0 mm ermittelt, was in guter Übereinstimmung mit den Herstellerangaben steht (62,6 mm). Zudem wurde in der Arbeit von BELOW [50] das Profil des Schallstrahls im Fokusbereich mit einem Membranhydrophon untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 20 b) als Quadrat des Schalldrucks relativ zum Quadrat des maximalen Schalldrucks dargestellt.

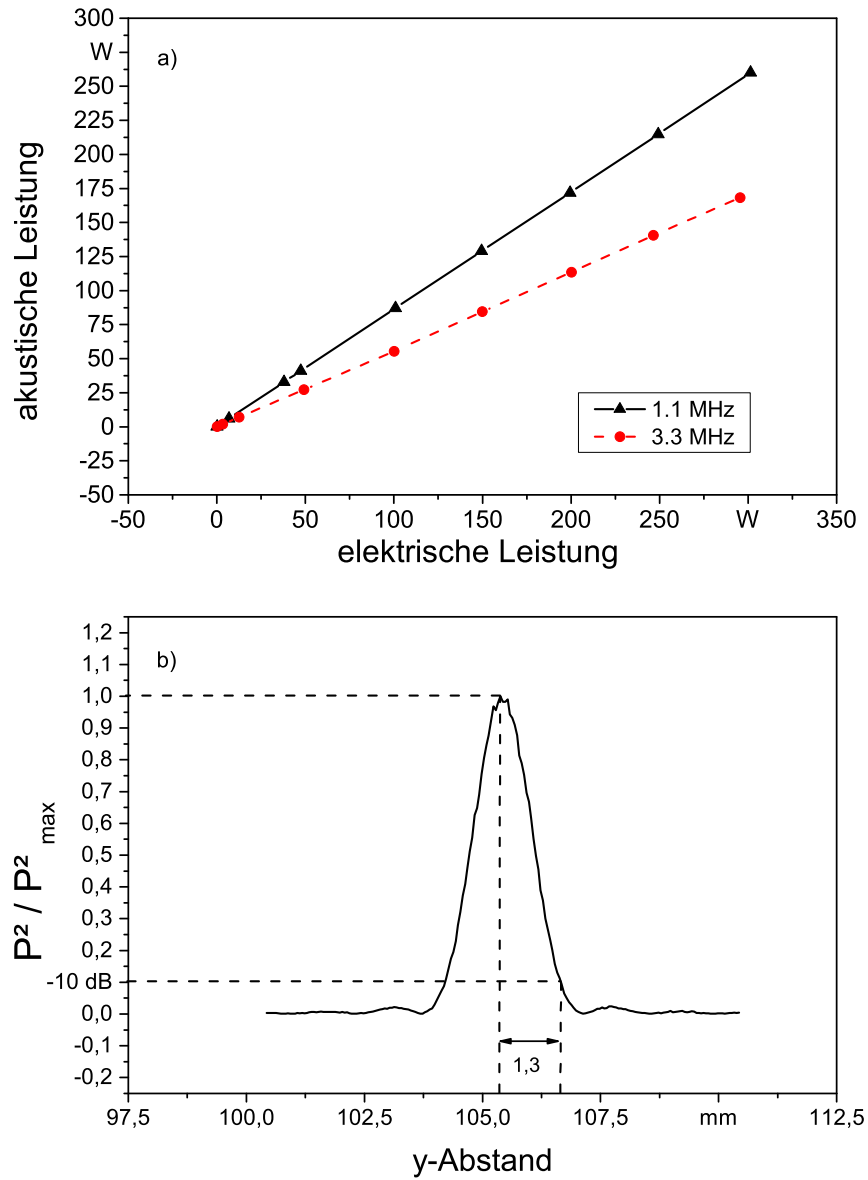


Abbildung 20: Ergebnisse der a) Leistungsmessungen mittels akustischer Strahlungskraftwaage b) Membranhydrophonmessung der Ultraschallstrahlbreite bei 1,1 MHz in der Ebene des Fokus.

Als Breite des Schallbündels im Fokus wird hier der Abfall des Quadrats des Schalldrucks auf 10% des Maximums, d. h. $(p/p_{max})^2 = 0,1$, herangezogen, was der -10 dB Breite des Schallbündels im Fokus entspricht. Wie in Abbildung 20 b) ergibt sich bei 1,1 MHz daraus ein Radius von $r_{-10dB} = 1,3$ mm. Als Intensität wird nun die zeitlich-gemittelte und räumlich-gemittelte Intensität (I_{sata} : spatial-average temporal-average intensity, vgl. IEC 62127-1 Ed.1.1 [60]) herangezogen. Dazu wird die über die akustische Strahlungskraftwaage ermittelte akustische Leistung auf die Fläche dieses -10 dB Schallbündels bezogen: $I_{sata} = P_{ak}/(\pi \cdot r_{-10dB}^2)$. Dieses Verfahren ergibt eine Messunsicherheit von $\pm 8\%$ für I_{sata} ($k=1$).

4.2.4 Durchführung der Zündversuche

Entsprechend der Ergebnisse der Voruntersuchung zum Zielkörper in Abschnitt 4.2.2 wurden für die Zündversuche Zielkörper aus Polyetheretherketon verwendet. Die Zielkörper hatten eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 5 mm. Sie wurden an der Flüssigkeitsoberfläche befestigt, damit sie nicht absinken oder weggedrückt werden konnten. Als Flüssigkeit wurde in allen Versuchen entmineralisiertes und physikalisch entspanntes Wasser verwendet. Die explosionsfähige Atmosphäre wurde mit einer externen Gemischaufbereitung erzeugt und in das Gefäß geleitet. Dadurch ließ sich die Gemischkonzentration einstellen. Auf die Verwendung von brennbaren Flüssigkeiten als Ausbreitungsmedium für den Ultraschall im Ultraschallbad wurde aus mehreren Gründen verzichtet. Erstens wäre es kaum möglich, die Brennstoffkonzentration am Ort einer möglichen Zündung genau zu bestimmen. Insbesondere für leicht flüchtige Flüssigkeiten mit niedrigen Zündtemperaturen, wie Diethylether oder Schwefelkohlenstoff², würde die Brennstoffkonzentration weit oberhalb der am leichtesten entzündlichen Konzentration oder sogar oberhalb der oberen Explosionsgrenze liegen. Außerdem wäre es für jede Flüssigkeit notwendig, das Schallfeld des HIFU-Wandlers hinsichtlich abgestrahlter Leistung, sowie Lage und Durchmesser des Fokus einzeln zu bestimmen, was einen immensen experimentellen Mehraufwand dargestellt hätte. Zudem ist die verwendete Messtechnik für Wasser kalibriert und könnte insbesondere durch die zum Teil aggressiven Flüssigkeiten beschädigt werden. Durch die externe Gemischaufbereitung lässt sich dagegen die Brennstoffkonzentration auf 1% genau einstellen und der verwendete Dampf beliebig austauschen, ohne dass die akustischen Größen in der Flüssigkeit neu bestimmt werden müssen.

²Schwefelkohlenstoff ist schon in geringen Konzentrationen leichtentzündlich und sehr giftig. Bei der Verwendung müssen unbedingt die Hinweise aus dem Sicherheitsdatenblatt beachtet und angemessene Schutzmaßnahmen getroffen werden.

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass Wasser eine höhere akustische Impedanz aufweist als viele brennbare Flüssigkeiten, z.B. Kohlenwasserstoffe und annähernd die gleiche wie der leicht entflammbare Schwefelkohlenstoff. Dadurch ist der in den Kunststoff-Zielkörper transmittierte Anteil der Ultraschallwelle höher oder gleich dem bei Verwendung dieser brennbaren Flüssigkeiten. Die ermittelten Werte sind dementsprechend tendenziell auf der sicheren Seite. Zwar wäre die Impedanz von Glyzerin noch näher an der der Kunststoffe, jedoch ist auch sein akustischer Absorptionskoeffizient höher als der von Wasser [53], sodass dadurch kein Vorteil entsteht. Somit lassen sich mit einem wasserbefüllten Versuchsgefäß in Kombination mit einer externen Gemischaufbereitung die Worst-Case-Bedingungen mit weniger Aufwand und genauer erzeugen als unter Verwendung von brennbaren Flüssigkeiten.

Die Zündversuche wurden bei einer Wassertemperatur von circa 24°C durchgeführt. Während der Zündversuche stieg diese Temperatur bei eingeschaltetem HIFU-Wandler nicht über 30°C an. Bei diesen Temperaturen ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf das Zündverhalten der explosionsfähigen Atmosphären unkritisch.

Für die Zündversuche wurde ein PEEK-Zielkörper an der Flüssigkeitsoberfläche befestigt. Die Position der stärksten Erwärmung wurde ermittelt, indem der HIFU-Wandler bei fixiertem Zielkörper mit einer Stellschraube verschoben und die Temperatur an der Zielkörperoberseite mit der Thermokamera beobachtet wurde. Diese Distanz war circa 5 mm geringer als der geometrische Fokus. Da der Fokus des HIFU-Wandlers in der Ausbreitungsrichtung jedoch eine Länge von circa 10 mm aufweist (Rückgang um 50%), sind geringe Veränderungen im Abstand zwischen Wandler und Zielkörper vernachlässigbar.

Die Thermokamera, die Hochgeschwindigkeitskamera und die Aufnahme des schlierenoptischen Strahlengangs wurden gestartet und anschließend der Ultraschall eingeschaltet. Der Zielkörper wurde so lange beschallt, bis es zu einer Zündung kam oder sich die Temperatur nicht mehr signifikant änderte. Die längsten Zündversuche dauerten dabei 3 min. Im Fall einer Zündung wurde der Versuch mit verminderter Schalleistung bei gleicher Brennstoffkonzentration wiederholt, bis eine untere Leistungsgrenze für diese Konzentration festgesetzt werden konnte.

Da Schwefelkohlenstoff mit 95°C [5] die niedrigste Zündtemperatur unter allen Gasen und Dämpfen aufweist und zunächst überprüft werden sollte, ob

unter den gegebenen Bedingungen überhaupt eine Zündung möglich wäre, wurden die Untersuchungen mit diesem Dampf begonnen. Aus den Zündversuchen von WELZEL [61] mit durch optische Strahlung erwärmten heißen Partikeln ist bekannt, dass die am leichtesten entzündlichen Konzentrationen für Schwefelkohlenstoff im mageren Bereich, d. h. unterhalb der stöchiometrischen Gemischkonzentration, liegen. Entsprechend wurden Konzentrationen von 2% bis 10% für die Untersuchungen gewählt. Dabei wurde mit der stöchiometrischen Konzentration von 7% und einer Ultraschallleistung von 160 W begonnen. Beide Werte wurde sukzessive variiert, um eine Zündgrenze für Schwefelkohlenstoff zu finden [57].

Neben Schwefelkohlenstoff wurden Zündversuche mit Diethylether (Zündtemperatur 175°C, Temperaturklasse T4) durchgeführt. Auch hier war die am leichtesten entzündliche Konzentration von 12,5% gegenüber heißen Partikeln aus den Untersuchungen von WELZEL [61] bekannt und diente als Orientierung. Entsprechend wurden Konzentrationen von Diethylether von 9% bis 13% verwendet und wiederum die Zündgrenze hinsichtlich der Ultraschallleistung gesucht, aus der sich dann die Intensität I_{sata} ableiten ließ. Die Zündversuche begannen mit einer akustischen Leistung von 6,6 W.

4.2.5 Kontrolluntersuchungen bei 20 kHz

Um zu überprüfen, dass die Verwendung von Ultraschall im MHz-Bereich die Worst-Case-Bedingungen tatsächlich widerspiegelt, wurde der HIFU-Wandler gegen eine 20 kHz Leistungs-Sonotrode ausgetauscht und damit unterschiedliche Zielkörpermaterialien verschiedener Abmessungen beschallt. Mit der Thermokamera wurde dabei untersucht, ob es bei der Verwendung der Sonotrode zu einer signifikanten Erwärmung der bestrahlten Zielkörper kommt.

4.3 Ergebnisse der Zündversuche mit fokussiertem Ultraschall

Bei Bestrahlung des PEEK-Zielkörpers an der Flüssigkeitsoberfläche konnte mit der Thermokamera ein Temperaturanstieg an seiner Oberfläche beobachtet werden. Abbildung 21 a) und 21 b) zeigen beispielhaft die Temperatur-Zeit-Diagramme für zwei Zündversuche mit Diethylether bei unterschiedlichen Intensitäten. Oberhalb von $530 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ kam es zu einer eruptiven Entstehung einer Kunststoffblase an der Oberfläche des PEEK-Zielkörpers, was mit einem Sprung der Oberflächentemperatur einherging. Dieses Ereignis erfolgte um so schneller, je höher die verwendete Intensität war. Dabei konnten Zündungen sowohl von Schwefelkohlenstoff als auch von Diethylether

an der heißen Oberfläche des Zielkörpers beobachtet werden. In Abbildung 21 b) ist erkennbar, dass die Zündung nicht direkt auf die Blasenentstehung erfolgt, sondern auch zeitverzögert auftreten kann. Wie Abbildung 21 a) zeigt, führte die Entstehung einer solchen Kunststoffblase jedoch nicht immer auch zu einer Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre, selbst wenn die Normzündtemperatur des verwendeten Brennstoffs überschritten wurde. Unterhalb von $500 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ entstand keine Kunststoffblase mehr und die Oberflächentemperatur lag stets unterhalb von 100°C .

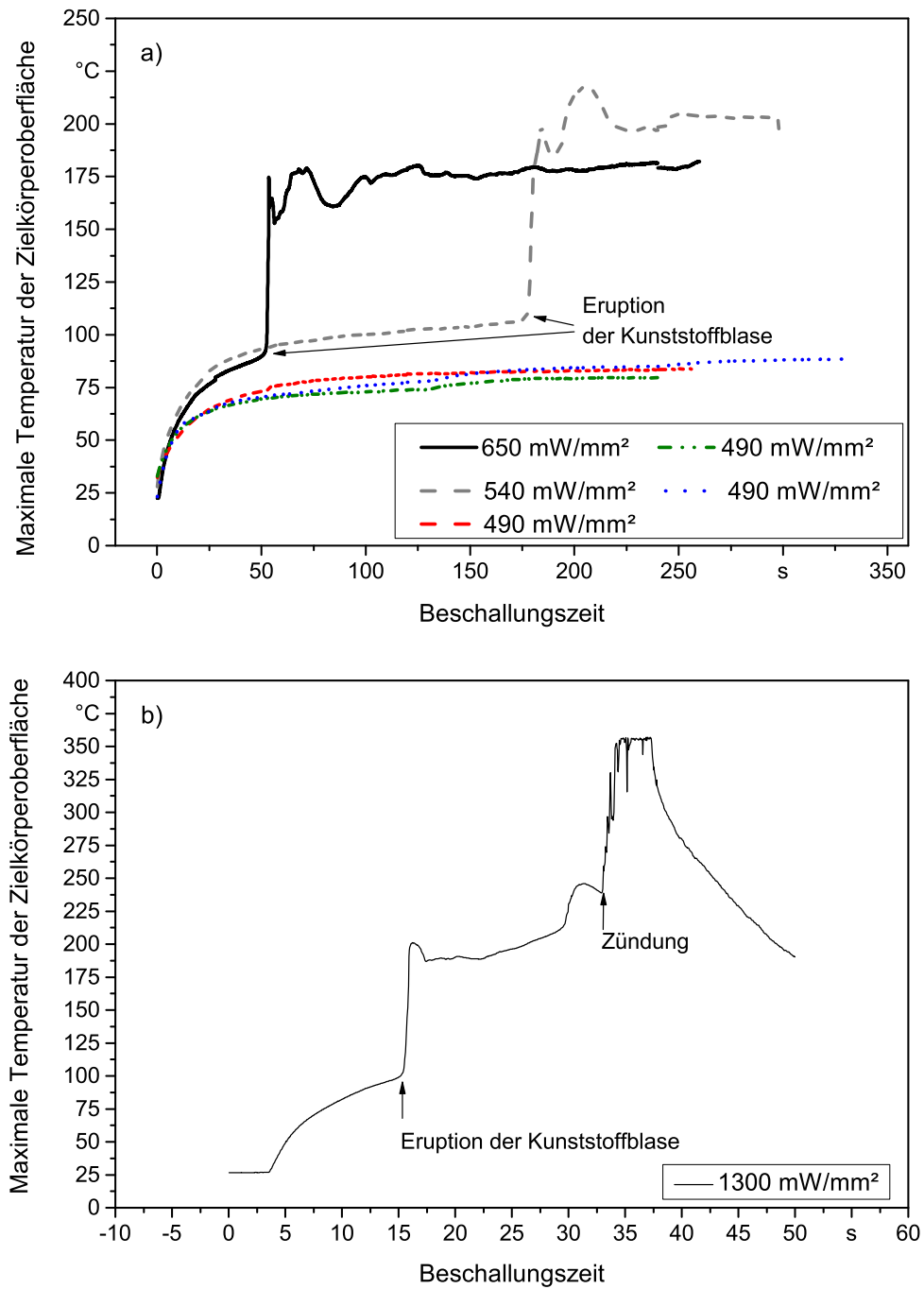


Abbildung 21: Entwicklung der Zielkörperoberflächentemperatur (a) bei Nichtzündung zwischen $490 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ und $650 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ sowie (b) bei Zündung bei $1300 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$.

Die räumliche Temperaturentwicklung an der Zielkörperoberfläche lässt sich anhand der Bilder der Thermokamera nachvollziehen [57]. In Abbildung 22 ist eine Abfolge dieser Bilder dargestellt. Man kann die Entstehung des heißen Flecks kurz nach Einschalten des Ultraschalls erkennen, der sich zu einer heißen Kunststoffblase entwickelt. Nach circa 10 s ist die heiße Blase bereits wieder etwas abgekühlt, wohingegen sich um sie herum ein heißer Ring gebildet hat, der nun die Maximaltemperatur, in diesem Fall um 350°C und damit am Schmelzpunkt von PEEK, aufweist. Häufig konnte kurz vor der Zündung die Entstehung einer zweiten, kleineren Kunststoffblase in dem Spalt zwischen heißem Ring und der Blase beobachtet werden, die einen starken Temperaturanstieg mit sich brachte.

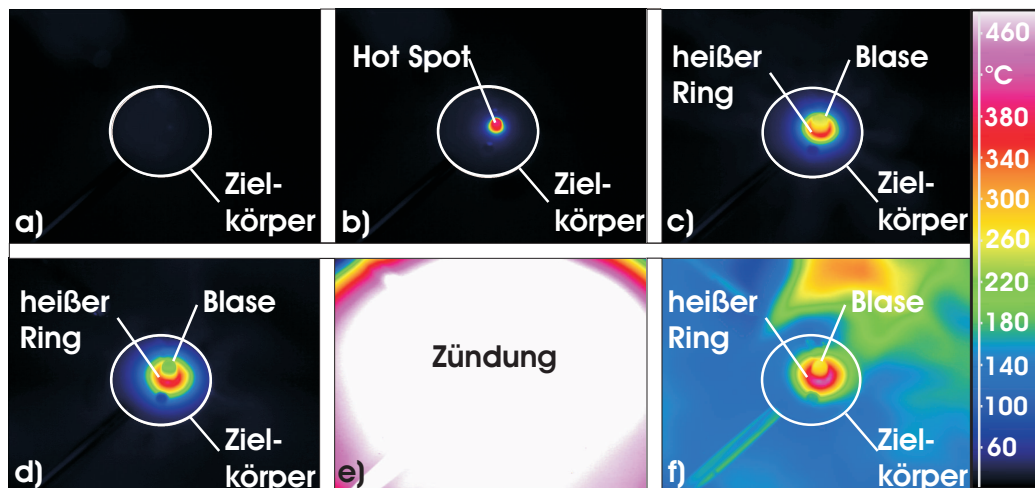


Abbildung 22: Thermographische Aufnahme der Zielkörperoberfläche: a) Zielkörper vor Einschalten des Ultraschalls b) Hot-Spot-Entstehung nach Einschalten des Ultraschalls c) + d) Entwicklung des heißen Ringes um die Kunststoffblase e) Zündung f) Abkühlung nach Abschalten des Ultraschalls.

Auch in den Aufnahmen des schlierenoptischen Strahlengangs lässt sich die Erwärmung des Zielkörpers bis hin zur Zündung verfolgen, wie in Abbildung 23 für einen Zündversuch mit Schwefelkohlenstoff bei 5700 mW/mm^2 abgebildet [57]. Ungefähr eine Sekunde nach Einschalten des Ultraschalls lässt sich auf der Zielkörperoberfläche eine kleine Blase erkennen. Oberhalb wird durch die Schlierenoptik eine senkrecht aufsteigende Wärmeströmung sichtbar. In Abbildung b) ist nach circa 3 s die Ausbildung einer Reaktionszone und schließlich in Abbildung c) und d) die Flammenfront der Zündung erkennbar.

Die Ergebnisse der Zündversuche mit Schwefelkohlenstoff [57] und Diethylether sind in Abbildung 24 in Abhängigkeit von der verwendeten Brennstoffkonzentration und der Intensität zusammengefasst. Für Schwefelkohlenstoff lag die Schwelle zur Zündung bei $1170 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ bei einer Schwefelkohlenstoffkonzentration von 2%. Dabei kam es zu einem „Abfackeln“ des Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemisches, das von einem zischenden Geräusch begleitet wurde. Unterhalb der Schwelle von 2% ist keine Durchreaktion des Schwefelkohlenstoff-Luft-Gemischs zu erwarten. In Richtung höherer Konzentrationen wurden höhere Intensitäten zum Auslösen einer Zündung benötigt. Bei der stöchiometrischen Konzentration von 7% lag die Grenze bei einer Intensität von $6100 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$. In diesem Konzentrationsbereich kam es zu einer heftigen Reaktion mit einem scharfen Knall und einer bläulichen Flamme. Für Diethylether einer Konzentration von 12% und 13% lagen die geringsten Intensitäten bei $528 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$.

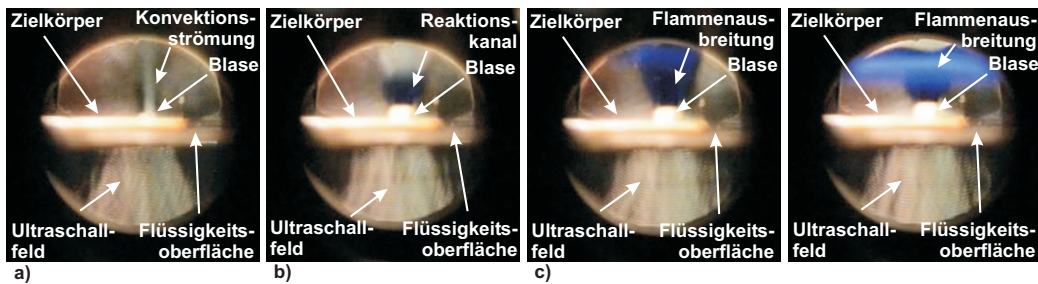


Abbildung 23: Schlierenoptische Aufnahmen des Zielkörpers während der Beschallung: a) $t \approx 1.0 \text{ s}$ b) $t \approx 3.0 \text{ s}$ c) $t \approx 3.1 \text{ s}$ d) $t \approx 3.2 \text{ s}$

Immer dann, wenn eine Kunststoffblase entstand, war dementsprechend eine Zündung nicht mehr auszuschließen. Die Zündungen gingen einher mit einer heftigen Reaktion mit einer deutlich gelblichen Flamme. Höhere Konzentrationen könnten prinzipiell noch geringere Werte ergeben. Dies ist in dieser Versuchsanordnung jedoch nicht möglich, da unterhalb von 500 mW/mm^2 keine Kunststoffblasen mehr austraten und somit keine ausreichend hohen Temperaturen an der Zielkörperoberfläche erreicht wurden. Bei Verwendung eines anderen Zielkörpermaterials, das einen höheren Absorptionskoeffizienten aufweist, könnten auch schon geringere Intensitäten zur Ausbildung eines Hot Spots führen. Dies kann jedoch durch einen Sicherheitsabstand bei der Festlegung des Grenzwertes berücksichtigt werden.

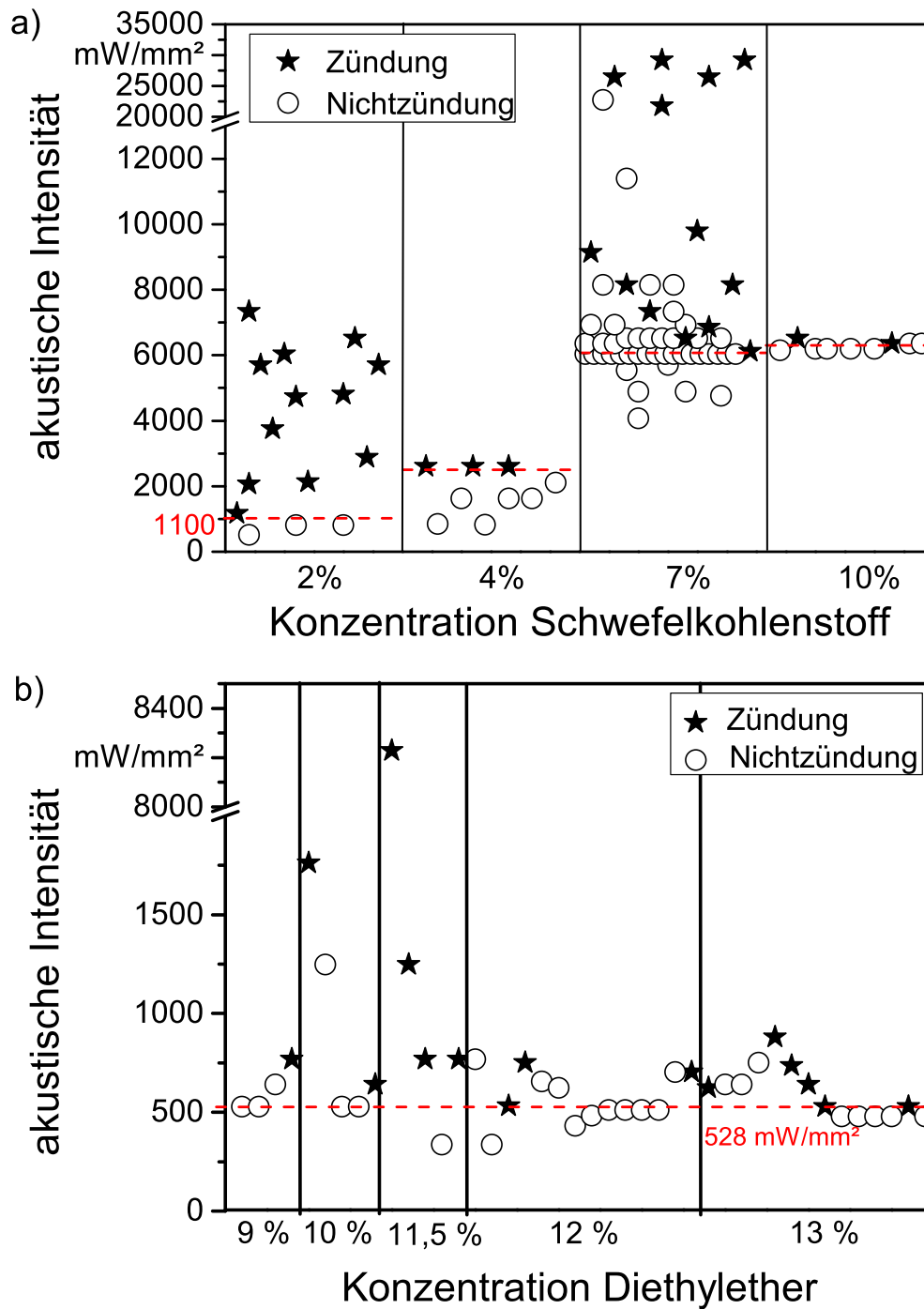


Abbildung 24: Ergebnisse der Zündversuche mit a) Schwefelkohlenstoff [57] und b) Diethylether

Die Kontrolluntersuchungen mit der Sonotrode bei 20 kHz zeigten, dass es zu keiner signifikanten Erwärmung der verwendeten Zielkörper kam. Dagegen war starke akustische Kavitation und eine deutliche Erwärmung des umgebenden Wassers von circa 15°C in 15 Minuten zu beobachten.

4.4 Diskussion der Zündwirksamkeit in Flüssigkeiten bei fokussiertem Ultraschall im MHz-Bereich

Aus den Vorversuchen hinsichtlich des Zielkörpermaterials geht hervor, dass sich Kunststoffe durch fokussierten Ultraschall erwärmen lassen. Dies ist auf ihr viskoelastisches Verhalten zurückzuführen. Die Molekülketten des Kunststoffs werden mit jeder Ultraschallschwingung gestreckt und entspannt, sodass es zu einer Änderung der Entropie kommt. Wegen der geringen thermischen Leitfähigkeit von PEEK und PMMA und wegen der hohen Wechselgeschwindigkeit zwischen Spannung und Entspannung verläuft dieser Prozess adiabatisch, sodass es entsprechend $dQ \leq T \cdot dS$ zu einer Temperaturerhöhung kommen muss [62].

Obwohl die akustische Impedanz von Gips und Graphit noch näher an der von Wasser liegt, als die der beiden verwendeten Kunststoffe, konnte für sie keine nennenswerte Temperaturerhöhung durch Beschallung erzielt werden. Sie sind entsprechend im Hinblick auf eine Zündgefahr durch Absorption von Ultraschall unkritisch. Da PMMA durch die Erwärmung über seinen Schmelzpunkt hinaus beschädigt wurde, kam es zu einer Verschlechterung der Fähigkeit dieses Materials, die akustische Energie in Wärme umzuwandeln. Dagegen ließen sich mit dem temperaturbeständigerem PEEK-Zielkörper Temperaturen von mehreren 100°C erzielen, sodass sich dieses Material als Zielkörper für Zündversuche eignet. Insgesamt zeigt sich, dass die Anzahl der Materialien, die für diesen Zündmechanismus in Frage kommen, stark eingeschränkt ist. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass viskoelastische Materialien, die leicht entflammbar sind (z. B. Bitumen, Bernstein), sich durch akustische Absorption selbst entzünden könnten, sodass eine explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche dann an der offenen Flamme entzündet werden könnte.

Die Zündversuche haben gezeigt, dass es möglich ist, durch Ultraschall in einer Flüssigkeit eine Zündung an einer Phasengrenze flüssig-gasförmig auszulösen, wenn die akustische Energie von einem dort fixierten, absorbierenden Körper in Wärme transformiert wird. Dazu müssen jedoch mehrere Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein. Zum einen wird hochintensiver fokussierter

Ultraschall benötigt. Die in den Zündversuchen ermittelte Zündgrenze lag dabei bei $528 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ und damit um mehr als zwei Größenordnungen über dem derzeit gültigen Grenzwert von 1 mW/mm^2 nach DIN EN 1127-1:2011 [1]. Zum anderen muss der Körper an der Phasengrenze flüssig-gasförmig spezielle Bedingungen erfüllen. Dabei bestätigen sich die theoretischen Vorüberlegungen bezüglich seiner akustischen, thermischen und geometrischen Eigenschaften (vgl. Abschnitt 4.1).

Die thermographischen Bilder und die Temperatur-Zeit-Diagramme zeigen, dass nicht allein die maximale Temperatur über die Auslösung der Zündung bestimmt, sondern auch die Ausdehnung des Hot-Spots auf dem Zielkörper. So trat insbesondere an der Schwelle zur Zündgrenze die Zündung erst nach Ausbildung des heißen Ringes um die Kunststoffblase ein, obwohl die Kunststoffblase im Moment der Eruption häufig höhere Temperaturen aufwies, als der heiße Ring. Letzterer wies aber erstens eine größere Fläche auf, was sich positiv auf die Zündung auswirkte [54, 63]. Zweitens trat an der Spitze der heraustreten Blase Turbulenz auf, die einer Zündung entgegenwirkte, da bei höheren Geschwindigkeiten weniger Wärme an die Gasphase übertragen werden kann. Entsprechend steigt die Zündtemperatur an [63, 64].

Im Hinblick auf den Einfluss der Brennstoffkonzentration auf die Zündwilligkeit lieferten die Zündversuche qualitativ ähnliche Ergebnisse wie die Untersuchungen von WELZEL [61] zu durch optische Strahlung erwärmten Partikeln. Für Schwefelkohlenstoff lag die Zündschwelle für 2% am niedrigsten. Für geringere Konzentrationen wurden keine Untersuchungen durchgeführt, da so dünne Konzentrationen mit der verwendeten Gemischaufbereitung kaum stabil hergestellt werden können. Dies war jedoch nicht nötig, da die Untersuchungen zu Diethylether bei 12% und 13% eine harte Zündgrenze bei $528 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ lieferten. Diese Konzentrationen waren auch bei WELZEL [61] die zündwilligsten. Unterhalb dieser Intensität bildete sich keine Kunststoffblase mehr aus und die Oberflächentemperatur blieb unterhalb von 100°C , sodass eine Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre ausgeschlossen werden kann. Die Intensität muss offenbar einen Schwellenwert übersteigen, damit die Erwärmungsrate den Zielkörper im Inneren zum Schmelzen bringt, sodass es durch damit verbundenen Druckanstieg zur Eruption der heißen Kunststoffblase kommt. Zwar ist dieser Vorgang von dem Material des verwendeten Zielkörpers abhängig, doch wie oben beschrieben zeigen die Ergebnisse der Voruntersuchungen, dass die Zahl der kritischen Materialien so begrenzt ist, dass der Unsicherheit über diesen Einfluss durch einen Sicherheitsabstand Rechnung getragen werden kann. Letztlich zeigen die Kuntrolluntersuchungen bei 20 kHz, dass fokussierter Ultraschall im MHz-Bereich der

kritischere Fall ist [65].

5 Untersuchungen zur Zündwirksamkeit bei akustischer Kavitation im kHz-Bereich

5.1 Theoretische Untersuchungen

Die bisherigen Untersuchungen in Flüssigkeiten haben gezeigt, dass hochintensiver fokussierter Ultraschall zu Zündungen an einer Flüssigkeitsoberfläche führen kann, wenn er durch einen die Flüssigkeitsoberfläche durchdringenden Absorber in Wärme umgewandelt wird. Dazu wurde Ultraschall im MHz-Bereich verwendet, da die hohen Frequenzen zu kurzen Wellenlängen führen und damit eine scharfe Fokussierbarkeit ermöglichen. Es wurde zudem bereits darauf hingewiesen, dass akustische Kavitation bei diesen Frequenzen vernachlässigt werden kann. Im Folgenden soll nun der kHz-Bereich näher untersucht werden, bei dem starke Kavitation auftritt.

Unter akustischer Kavitation versteht man die durch Ultraschall angeregte Entstehung von Blasen in Flüssigkeiten. Dabei ist zu trennen zwischen Kavitationsblasen, die aus bereits vorhandenen Mikroblasen entstehen und im Ultraschallfeld zur Oszillation angeregt werden (Gasblasen- bzw. weiche Kavitation) und solchen, die durch ein Aufreißen der Flüssigkeit in der Unterdruckphase des Ultraschallfeldes entstehen (Dampfblasen- bzw. harte Kavitation). Im zweiten Fall ist der entstehende Hohlraum mit dem Dampf der umgebenden Flüssigkeit gefüllt, sodass kein Oxidationsmittel vorliegt und somit kein explosionsfähiges Gemisch.

Im Fall der Dampfblasenkavitation könnte das Gemisch im Inneren der Blase jedoch zündfähig sein. Entsprechend liegt ein Zweiphasensystem aus Gasblasen und Flüssigkeit vor. Auf Grund von Instabilitäten kann es in der Überdruckphase der Ultraschallwelle zu einem Kollaps der Kavitationsblase kommen, wobei sie innerhalb einer Mikrosekunde in einem sich beschleunigenden Prozess von einem Durchmesser der Größenordnung $200\text{ }\mu\text{m}$ auf $1\text{ }\mu\text{m}$ zusammenfällt. Wegen der hohen Geschwindigkeit dieses Kollaps kommt es im Inneren der Kavitationsblase zu einer adiabatischen Zustandsänderung, sodass kurzzeitig Temperaturen von mehreren 1000 K und Drücke von mehreren 100 MPa erreicht werden. Unter diesen Bedingungen werden im Inneren und in der unmittelbaren Umgebung der Kavitationsblase chemische Reaktionen angeregt oder beschleunigt und starke Strömungen erzeugt, was sich Anwendungen in der Prozess- und Reinigungsindustrie zunutze machen. Gleichzeitig

stellt sich jedoch die Frage, ob in dem Zweiphasensystem durch die hochkonzentrierte Energie in den Kavitationsblasen Zündungen von Blasen unter der Flüssigkeitsoberfläche entfacht werden können, die in eine explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche durchschlagen.

Um die Zündwirksamkeit der akustischen Kavitation zu untersuchen, ist es zur Entwicklung eines Worst-Case-Szenarios notwendig, Einflussgrößen zu identifizieren, die eine solche Zündung provozieren könnten. Dabei muss möglichst starke Kavitation möglichst nahe der explosionsfähigen Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche erzeugt werden. Eine zu hohe Überdeckung einer Zündung unter der Flüssigkeitsoberfläche könnte sonst das Durchzünden aus dem Bad heraus verhindern, wie dies bei Tauchsicherungen ausgenutzt wird. Zudem muss versucht werden, Kavitationsblasen gefüllt mit leicht entzündlichem Gasgemisch zu erzeugen.

Die Bedingungen für die Anregung von Gasblasen in einer Flüssigkeit zur Gasblasenkavitation beschreibt APFEL [66]. Die maximale Temperatur in der Kavitationsblase ist abhängig vom Gas im Inneren und dem Verhältnis der Wärmekapazitäten $\gamma = c_p/c_v$, sodass sich für Argon die höchsten Temperaturen ergeben [67]. Die Einflussgrößen auf die Kavitation sind nach SUSLICK [38] die Frequenz, die Amplitude des Schalldrucks, die Temperatur der Flüssigkeit, die gelöste Gasmenge, gelöste Schadstoffe (Verunreinigungen) sowie suspensierte Feststoffe im Schallfeld. Bei geringeren Frequenzen nimmt danach die Größe der Kavitationsblasen zu und ihre Anzahl ab. Amplituden- und Temperaturerhöhung führen zu größeren Kavitationsblasen, gelöste Gasmenge sowie suspensierte Feststoffe im Schallfeld erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Kavitation [38, 66, 68]. PARLITZ [69] und LUTHER [70] beschreiben die Bildung von Blasenstrukturen zu „Clustern“ und METTIN [71] darüber hinaus unterschiedliche Kavitationsstrukturen in Abhängigkeit von der Ultraschallquelle und der Schallfeldgeometrie. Demnach entstehen an der Spitze von in Flüssigkeit betriebenen Ultraschallsonotroden besonders starke Kavitationserscheinungen aus einer Vielzahl von Blasen, die aufeinander zuströmen. Untersuchungen zu Bewegungen von einzelnen Kavitationsblasen in der Nähe einer Sonotrodenstirnfläche wurden von NOWAK [72] durchgeführt. Daraus geht hervor, dass insbesondere große Kavitationsblasen beim Kollaps hohe Geschwindigkeiten erreichen.

Das Worst-Case-Szenario besteht folglich aus einem 20 kHz-Ultraschallbad (20 kHz entspricht der Untergrenze gängiger Arbeitsfrequenzen in technischen Anwendungen) mit starker Kavitation nahe einer Flüssigkeitsoberflä-

che, die an eine leicht entzündliche explosionsfähige Atmosphäre angrenzt. Dazu wird eine leistungsstarke Sonotrode verwendet, deren Spitze von unten gegen die Flüssigkeitsoberfläche schallt. Um eine Zündung durch die Kavitation zu provozieren, wird explosionsfähiges Gemisch direkt in die Flüssigkeit eingeleitet, sodass einerseits immer Gasblasen als Kavitationskeime vorhanden sind, gleichzeitig kollabierende Kavitationsblasen in Wechselwirkung mit den eingeleiteten Blasen gebracht werden und das explosionsfähige Gemisch oberhalb der Flüssigkeit erhalten bleibt. Um schnell eine große Zahl an Blasen einzuleiten, wird eine Fritte verwendet. Für eine gezielte Einleitung von Blasen in Bereiche starker Kavitation wird das Gemisch alternativ mit einer Kanüle eingesprudelt. Diese beiden Untersuchungsbedingungen sind in Abbildung 25 dargestellt.

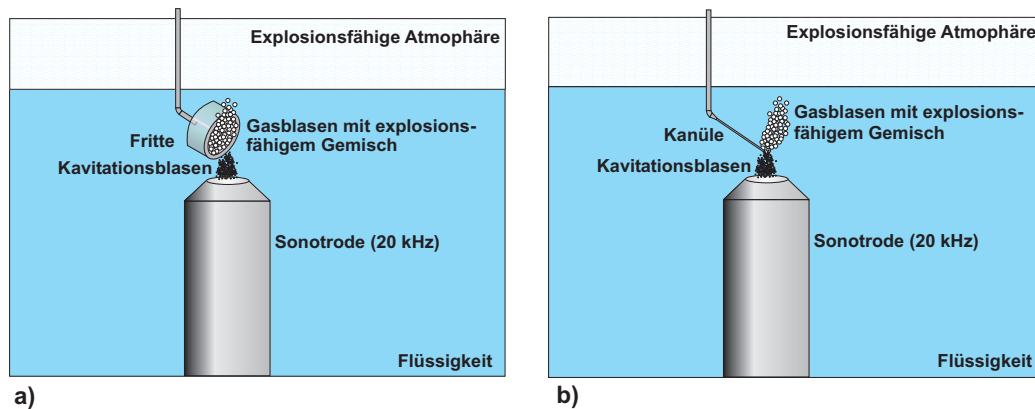


Abbildung 25: Worst-Case-Szenario für die Untersuchung der Zündwirksamkeit von akustischer Kavitation. Einleitung von explosionsfähigem Gemisch mittels a) einer Fritte b) einer Kanüle

5.2 Versuchsanordnung zur Zündwirksamkeit von Kavitation

Ziel der experimentellen Untersuchungen war im ersten Schritt, die in Abschnitt 5.1 beschriebene Worst-Case-Situation durch Beobachtungen in Vorversuchen zu präzisieren. In weiteren Schritten ließen sich dann Zündversuche mit unterschiedlichen explosionsfähigen Gemischen durchführen. Die Umsetzung der Worst-Case-Bedingungen entsprechend Abschnitt 5.1 erfolgte durch Modifikation des Versuchsaufbaus für fokussierten Ultraschall (vgl. Abschnitt

4.2.1), dargestellt in Abbildung 26.

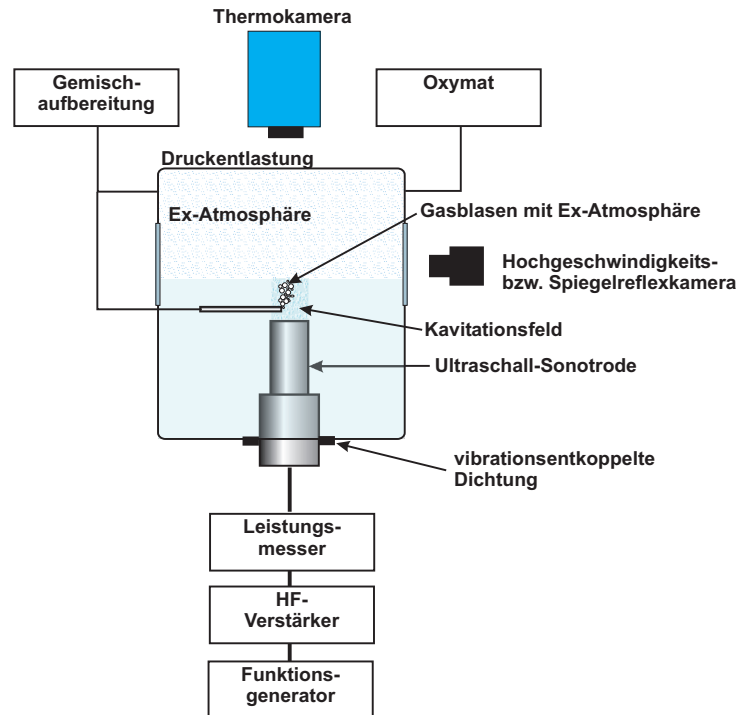


Abbildung 26: Umsetzung des Worst-Case-Szenarios für die Zündwirksamkeit von akustischer Kavitation

Gegenüber dem Aufbau für Zündversuche mit fokussiertem Ultraschall wurde der HIFU-Wandler gegen eine Sonotrode (Sonoprozessor DG 2000, Telsonic AG) mit einer maximalen elektrischen Leistung von 2000 W aus der Prozessindustrie ausgetauscht. Außerdem wurde für die Zündversuche bei Kavitation auf den Zielkörper verzichtet. Zur Einleitung von Brennstoff-Luft-Gemisch unter der Flüssigkeitsoberfläche wurde eine in der Höhe verstellbare Zuleitung hinzugefügt, die einen Abzweig von der Gemischaufbereitung darstellte, die das Brennstoff-Luft-Gemisch über der Flüssigkeitsoberfläche erzeugte. Zur Beobachtung der Vorgänge im Versuchsgefäß wurden wiederum die Hochgeschwindigkeitskamera, die Thermokamera und eine Spiegelreflexkamera verwendet. Zudem wurde die Wassertemperatur sowie die Temperatur der Gasphase oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche mit zwei Thermoelementen gemessen. Zur Einstellung der explosionsfähigen Atmosphäre wurde wiederum die Gemischaufbereitung und zur Kontrolle der paramagnetische Sauerstoffanalysator (Siemens Oxymat 6F, vgl. Abschnitt 4.2.3) verwendet. Die Messung des Ultraschallfeldes unter der Flüssigkeitsoberfläche erfolgte mit

einem Hydrophon (Reson Typ TC4013-1).

Im Rahmen der Arbeit von HANKERS [73] wurde das Worst-Case-Szenario für Zündversuche auf Grundlage von Voruntersuchungen konkretisiert. Dazu wurde erst die Höhe des Wasserpegels über der Sonotrode variiert. Weiterhin wurde als Zuleitung des Brennstoff-Luft-Gemisches einerseits eine Fritte (Porengröße $200\text{ }\mu\text{m}$) verwendet, um eine große Anzahl kleiner Blasen einzuleiten, andererseits eine Kanüle, um die Blasen gezielt in Bereiche starker Kavitation einleiten zu können. Zudem wurden die Positionen von Fritte und Kanüle bezüglich der Sonotrode verändert. Hinsichtlich des Ultraschallsignals wurde die el. Leistung und die Betriebsart der Sonotrode (Dauerschall bzw. gepulster Modus) variiert.

Anschließend an diese Voruntersuchungen wurden Zündversuche mit unterschiedlichen Brennstoff-Luft-Gemischen durchgeführt. Verwendet wurden dabei Schwefelkohlenstoff (2% bis 7 %)-Luft-, Diethylether (12%)-Luft- und Wasserstoff (24%)-Luft-Gemische. Dabei wurde bei abgeschalteter Sonotrode zunächst die explosionsfähige Atmosphäre oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche erzeugt und wiederum mittels des Oxydaten kontrolliert. Dann wurde die Brennstoff-Luft-Zuleitung oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche verschlossen und die unterhalb geöffnet. Um die Situation weiter zu verschärfen, konnte mit einer separaten Zuleitung auch Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche eingeleitet werden.

Die Kavitation führt bei dauerhafter Beschallung über mehrere Minuten zu einer Temperaturerhöhung im Wasser. Deswegen wurde bei den Versuchen mit Diethylether ein Kryostat verwendet, um die Wassertemperatur während der Zündversuche konstant zu halten. Bei den Versuchen mit Schwefelkohlenstoff wurde darauf verzichtet, um zu überprüfen, ob diese Temperaturerhöhung wegen der geringen Normzündtemperatur von 95°C eine Zündung begünstigte. Im Allgemeinen wurde jedoch davon ausgegangen, dass eine mögliche Zündung durch Kavitation wegen der Ultraschallfrequenz innerhalb weniger Minuten Beschallungsdauer erfolgen würde, da pro Sekunde viele tausende Kavitationserscheinungen auftreten. Die Versuche mit Wasserstoff wurden deshalb stets nur kurzzeitig durchgeführt, sodass es zu keiner signifikanten Temperaturerhöhung kam [73].

5.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Kavitation

Um das Schallfeld der Sonotrode hinsichtlich Ausdehnung und Stärke einschätzen zu können, wurde der Bereich vor der Sonotrode mit einem Hydrophon vermessen [73]. Dazu wurde eine Überdeckung von 75 mm über der Sonotrodenstirnfläche gewählt, da dies bei der Frequenz von 20 kHz in Wasser bei circa 24°C einer Wellenlänge entspricht. Wegen der zylindrischen Form der Sonotrode wurde ein rotationssymmetrisches Schallfeld angenommen. Ausgehend von einer Startposition auf der Rotationsachse der Sonotrode und in Höhe des Flüssigkeitsspiegels wurde das Schallfeld durch Verschiebung des Hydrophons in 5 mm-Schritten in horizontaler und vertikaler Richtung vermessen. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 27 dargestellt. Darin ist erkennbar, dass die höchsten Schalldrücke auf der Schallfeldachse im Abstand zwischen 10 mm und 30 mm von der Sonotrodenstirnfläche auftreten. Zu größeren Abständen hin fällt der Schalldruck rasch ab.

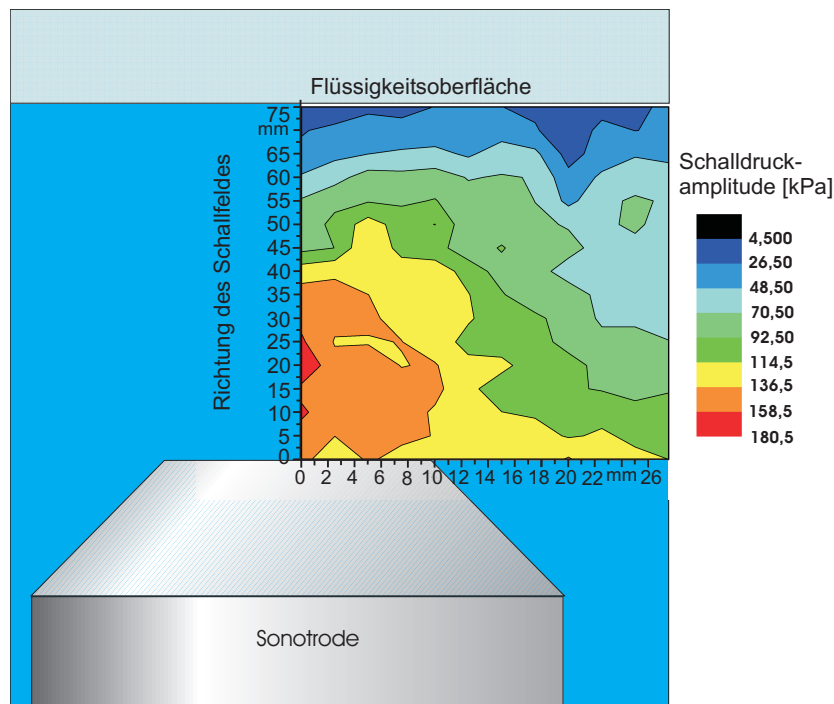


Abbildung 27: Auswertung der Schalldruckmessung des Hydrophons

Die Ergebnisse zur Flüssigkeitsüberdeckung in der Versuchsanordnung nach

Abbildung 26 sind in Abbildung 28 für unterschiedliche Wassersäulen jeweils vor und nach Einschalten der Sonotrode dargestellt. Berührt die Sonotrodenoberfläche von unten die Flüssigkeitsoberfläche, bildet sich beim Einschalten der Sonotrode eine mehrere Zentimeter hohe Fontäne, umgeben von einem dichten Nebel aus Flüssigkeitströpfchen. Wird die Flüssigkeitsüberdeckung erhöht, verringert sich die Höhe der Fontäne und geht schließlich in eine wellenartige Aufwölbung der Oberfläche über. Bei eingeschalteter Sonotrode und überdeckter Sonotrode (Bilder 2a, 3a, 4a) ist zudem das Kavitationsfeld als nebelartige Erscheinung unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche erkennbar. In den Bildern 3a) und 4a) mit Überdeckungen von 23 mm und 33 mm ist die Ausbildung von Kavitationsfiguren erkennbar: Die Kavitationsblasen scheinen ausgehend von der Sonotrodenoberfläche in Form einer umgekehrten Parabel aufeinander zuzulaufen und sich im Scheitelpunkt zu vereinen. Dies ist entsprechend den Hydrophonmessungen auch der Bereich des maximalen Schalldrucks.

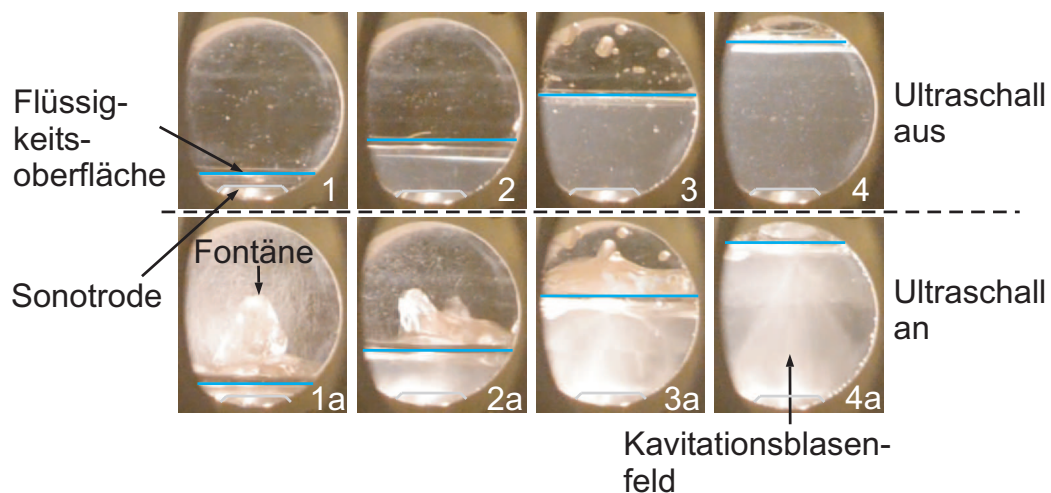


Abbildung 28: Variation der Wassersäule über der Sonotrodenstirnfläche 1) 0 mm, abgeschaltete Sonotrode 1 a) 0 mm, eingeschaltete Sonotrode 2) 7 mm, abgeschaltete Sonotrode 2 a) 7 mm, eingeschaltete Sonotrode 3) 23 mm, abgeschaltete Sonotrode 3 a) 23 mm, eingeschaltete Sonotrode 4) 33 mm, abgeschaltete Sonotrode 4 a) 33 mm, eingeschaltete Sonotrode [73]

Ziel einer sehr geringen Überdeckung der Sonotrodenstirnfläche hätte sein können, dass bei einer möglichen Zündung unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche nur eine dünne Flüssigkeitsschicht durchbrochen werden müsste, um die explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche zu zünden.

Die Bilder zeigen aber, dass eine sehr geringe Überdeckung der Sonotrode mit Flüssigkeit keinen Vorteil bietet, da der akustische Strahlungsdruck zu einer Aufwölbung der Flüssigkeit führt. Demgegenüber steht, dass sich bei höheren Überdeckungen die akustische Kavitation deutlicher ausbilden kann und sich die Kavitationsblasen zu einem dichten Blasennebel vereinen. Für die weiteren Untersuchungen wurde deshalb davon ausgegangen, dass eine Wassersäule von 20 mm bis 30 mm über der Sonotrodenstirnfläche den kritischeren Fall darstellt, wenn der Vereinigungspunkt der Kavitationsblasen dicht unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche liegt und es nur zu einer geringen Aufwölbung der Flüssigkeit kommt [73].

Hinsichtlich der Untersuchungen zur Einleitung von Brennstoff-Luft-Gemisch in das Kavitationsfeld mittels der Fritte, sollte erreicht werden, dass eine große Zahl kleiner Blasen mit den Kavitationsblasen in Kontakt kommen und gleichzeitig auch Keime für die Kavitationsblasen bilden. Die Fritte wurde in drei unterschiedlichen Positionen verwendet: Auf Höhe des Flüssigkeitsspiegels parallel zur Sonotrodenstirnfläche, senkrecht zur Sonotrodenstirnfläche und in einem 45° Winkel. Am günstigsten stellte sich die 45° Position heraus, da die eingeleiteten Blasen weniger schnell aufstiegen als bei senkrechter Positionierung und die Fritte bei einer möglichen Zündung unter der Flüssigkeitsoberfläche dem Durchschlagen in die explosionsfähige Atmosphäre darüber nicht im Weg steht.

Abbildung 29 zeigt Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera vom der Einleitung der Blasen und dem Zusammenwirken bei angeregter Kavitation. Im ersten Bild ist die Sonotrode abgeschaltet. Im Moment des Einschaltens löst sich eine Ansammlung von feinen Kavitationsblasen von der Sonotrodenoberfläche ab und läuft auf die aufsteigenden Blasen aus der Fritte zu (Bild 2). Im dritten bis fünften Bild der Sequenz ist erkennbar, dass die eingeleiteten Blasen durch die auf sie einwirkenden Kavitationsblasen zertrümmert werden. Dies zeigt, dass die Kavitationsblasen auf die eingeleiteten Blasen einwirken können. Die Zertrümmerung der eingeleiteten Blasen verringert jedoch die Wahrscheinlichkeit einer Zündung. In Untersuchungen der Ausbreitung von Zündungen bzw. zündähnlichen Erscheinungen in Zweiphasensystemen (Blasen in Flüssigkeit) durch von außen erzeugten Stoßwellen, zeigte sich, dass Blasengrößen im Bereich von einigen Millimetern am leichtesten zu zünden sind [74, 75]. Wie in Abbildung 29 ersichtlich, liegen die mit der Fritte eingeleiteten Blasen vor Einschalten des Ultraschalls im Bereich von 1 mm, die zertrümmerten Blasen nach Anregung der Kavitation sind jedoch deutlich kleiner [73].

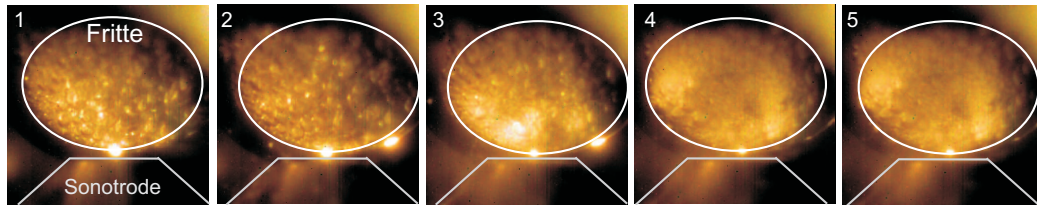


Abbildung 29: Einleitung von Blasen über Fritte im Winkel von 45° : 1) ohne Ultraschall; 2) $t=0$ s, Ultraschall eingeschaltet; 3) $t=0,035$ s, Entstehung der Kavitation an der Sonotrodenstirnfläche erkennbar; 4) $t=0,08$ s und 5) $t=0,134$ s, Zertrümmerung der eingeleiteten Blasen durch die Kavitation

Mit der Kanüle war es möglich, Blasen gezielt in Bereiche heftiger Kavitation einzuleiten. Dabei war insbesondere der in Abbildung 28 4 a) erkennbare Vereinigungspunkt der Kavitationsblasen von Interesse. Dies ist als mit der Spiegelreflexkamera aufgenommene Bildfolge in Abbildung 30 zu sehen. Ein Vorteil der Kanüle war, dass mit ihr die Position der Einleitung bei eingeschaltetem Ultraschall variiert werden konnte.

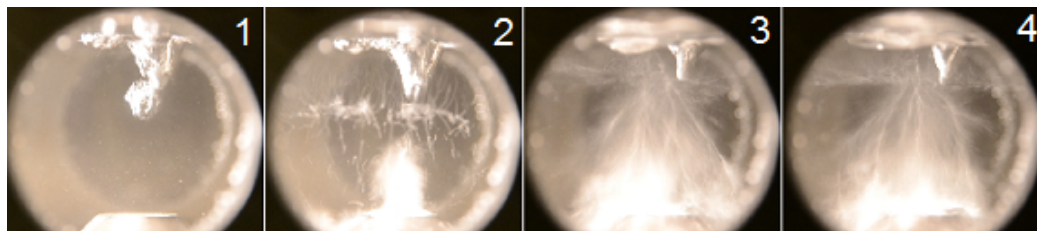


Abbildung 30: Einleitung von Blasen mit der Kanüle [73]

In der Bildfolge ist zu erkennen, dass die mit der Kanüle eingeleiteten Blasen größer waren, als bei Einleitung mit der Fritte. Sie hatten einen Durchmesser von circa 2 mm bis 3 mm. Außerdem wird deutlich, dass zum einen nach Einschalten des Ultraschalls der Blasenstrom aus der Kanüle durch den akustischen Strahlungsdruck in Richtung Flüssigkeitsoberfläche gedrängt wird (Bild 2), und zum anderen, dass die eingeleiteten Blasen ebenfalls durch die Kavitationsblasen zertrümmert wurden (Bild 3 und Bild 4). Durch Justieren konnte jedoch dafür gesorgt werden, dass der Blasenstrom tatsächlich mit den aufeinander zulaufenden Blasen in Kontakt kam.

Der für die Zündversuche verwendete Sonoprozessor DG 2000 kann maximal eine elektrische Leistung von 2000 W erzeugen. Die volle Leistung lässt

sich aber nur ausschöpfen, wenn die Flüssigkeit unter Druck gesetzt wird. Da die Zündversuche jedoch bei atmosphärischem Druck durchgeführt werden sollten, konnte nur eine Leistung von 650 W erreicht werden. Grund für diese Leistungsgrenze ist, neben dem Impedanzsprung zwischen Sonotrode und Flüssigkeit, dass die Kavitationsblasen die Dichte der Flüssigkeit absenken und es damit zu einer weiteren Verringerung des Impedanzverhältnisses zwischen kavitierender Flüssigkeit und Sonotrode kommt. Unterhalb von 100 W konnte zudem keine Bildung von Kavitationsblasen beobachtet werden. Entsprechend wurden die Untersuchungen in diesem Leistungsspektrum durchgeführt. Für die überwiegende Anzahl der Zündversuche wurde jedoch eine Leistung 650 W verwendet, um möglichst starke Kavitation zu erreichen.

Darüber hinaus bestand die Möglichkeit die Sonotrode im gepulsten Modus oder im „CW“-Modus (continuous wave, Dauerschall) zu betreiben. Die Pulslänge konnte dabei zwischen 0,1 s und 10 s eingestellt werden. Es zeigte sich, dass im gepulsten Modus eine Pulslänge von 1 s bis 2 s am besten für Zündversuche geeignet war, da sich bei kürzeren Intervallen kein Kavitationsfeld aufbaute. Vorteilhaft für das Auslösen einer Zündung könnte im gepulsten Modus sein, dass sich beim Einschalten der Sonotrode jeweils eine Welle von Kavitationsblasen von der Sonotrodenoberfläche ablöste und auf die eingeleiteten Blasen einwirkte (vergleichbar wie in Abbildung 30 Bild 2). In den Zündversuchen wurden dann in Pausen zwischen den Intervallen durch die kontinuierliche Einleitung stets neue Keime für die Gasblasenkavitation erzeugt.

Die Zündversuche wurden bei einer Wasserüberdeckung von 12 mm bis 40 mm durchgeführt. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse dieser Voruntersuchungen, wurden häufig Wasserpegel von 30 mm bis 35 mm verwendet. Zur Einleitung des Brennstoff-Luft-Gemisches während der Zündversuche wurden sowohl die Kanüle als auch die Fritte verwendet, da beide Verfahren unterschiedliche Vorteile gezeigt hatten. Die Kanüle wurde in einem Abstand von 9 mm bis 35 mm über der Sonotrodenstirnfläche positioniert, sodass das Gemisch stets mit Bereichen starker Kavitationserscheinungen in Kontakt kam. Auch hier wurde, im Einklang mit den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen, vielfach eine Höhe von 25 mm bis 30 mm eingestellt. Die Fritte wurde stets in einem Winkel von 45° zur Sonotrodenoberfläche verwendet.

Bei keinem der durchgeführten Zündversuche mit den oben genannten Gas-Luft-Gemischen konnte eine Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche beobachtet werden. Auch unterhalb dieser konnte keine Erscheinung beobachtet werden, die auf eine Zündung der Gasbla-

sen zurückzuführen wäre. Selbst die weitere Verschärfung des Worst-Case-Szenarios durch Verwendung von Wasserstoff-Sauerstoff im Mischungsverhältnis von 2:1 lieferte keine Zündung. In den Zündversuchen mit Schwefelkohlenstoff konnte jedoch nach einer Beschallungsdauer von 15 Minuten und einem durch den Ultraschall verursachten Temperaturanstieg auf 65°C eine gelbliche Eintrübung beobachtet werden, die weiterhin zunahm. Das Wasser erwärmte sich innerhalb von 60 Minuten bis auf fast 95°C, was der Normzündtemperatur dieses Dampfes entspricht. Nach Abschalten des Ultraschalls konnten Schwefelkörner im Wasser festgestellt werden, die für die gelbliche Eintrübung verantwortlich waren [73].

5.4 Diskussion der Zündwirksamkeit in Flüssigkeiten bei Kavitation im kHz-Bereich

Auf den ersten Blick mag es angesichts der extremen Bedingungen in und um die Kavitationsblase herum verwundern, dass trotz der Verwendung der am leichtesten entzündlichen Gas- und Dampf-Luft-Gemische keine Zündung durch die akustische Kavitation beobachtet werden konnte. Entsprechend ist einerseits zu diskutieren, ob die verwendeten Bedingungen und Einstellungen tatsächlich den schlimmsten anzunehmenden Fall nachbilden. Andererseits ist vor dem Hintergrund von Erkenntnissen aus anderen Arbeiten zur akustischen Kavitation zu überprüfen, welche Effekte eine Zündung behindern könnten.

Maßgeblich für die Worst-Case-Bedingungen ist es, dass auf der einen Seite die zu untersuchende Zündquelle - in diesem Fall die durch den Ultraschall bewirkte akustische Kavitation, die zu einer Bündelung der akustischen Energie führt - in einer möglichst extremen Ausprägung vorliegt. Auf der anderen Seite müssen Brennstoff und Oxidationsmittel in einem möglichst leicht entzündlichen Mischungsverhältnis vorliegen. Können die so ausgestaltete Zündquelle und das explosionsfähige Gemisch in direkten Kontakt gebracht werden, lässt sich die Zündwirksamkeit der Zündquelle überprüfen.

Entsprechend [71] liefern Sonotroden an ihren Stirnflächen maximale Kavitationserscheinungen. Durch die Verwendung der Leistungs-Sonotrode des Sonoprozessors DG 2000 liegt eine Ultraschallquelle vor, die eine höhere Leistung erbringen kann (2000 W), als sich tatsächlich in die Flüssigkeit ein koppeln ließ (650 W). Zudem lässt sich die Kavitation nicht beliebig durch Erhöhung der Ultraschallleistung erhöhen, da sie in eine Sättigung übergeht, wenn alle Kavitationskeime ausgeschöpft sind [69]. Durch die Einleitung von

Brennstoff-Luft-Gemisch wurden in den Zündversuchen zudem immer weitere Kavitationskeime in die Flüssigkeit eingebracht. Die Oberflächen von Fritte, Kanüle und Sonotrode sind zudem Grenzflächen, an denen sich Kavitationskeime bilden können. Hinsichtlich des Temperatureinflusses auf die Kavitation wurde in den Versuchen mit Schwefelkohlenstoff ein Temperaturbereich von Raumtemperatur bis fast zum Siedepunkt des Wassers abgedeckt. Der Einfluss der Frequenz auf die Kavitation wurde durch die Verwendung von 20 kHz Ultraschall Rechnung getragen, bei der besonders große Kavitationsblasen entstehen, die besonders heftig kollabieren. Damit sind die wesentlichen Einflussgrößen hinsichtlich der Kavitation nach [38] berücksichtigt worden. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Zündquelle Ultraschall in Form von akustischer Kavitation hinreichend maximiert wurde.

Auf der anderen Seite wurden explosionsfähige Gemische im Bereich ihrer leicht entzündlichsten Konzentrationen verwendet. Sie lagen einerseits als explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche vor, so dass an dieser Stelle die Worst-Case-Bedingung als erfüllt angenommen werden kann. Andererseits wurden sie auf unterschiedliche Weise mit den Kavitationsblasen in direkten Kontakt gebracht. Bei der Verwendung von Diethylether könnte eine Zündung der eingeleiteten Blasen dadurch verhindert worden sein, dass sich der Dampf im Wasser gelöst hat und so in Wirklichkeit kein explosionsfähiges Gemisch in den Blasen vorlag. Es wurde aber auch Schwefelkohlenstoff verwendet, das nicht hydrophil ist. Dennoch kam es auch dort zu keiner Zündung. Es ist zwar ebenfalls möglich, dass die eingeleiteten Gemische innerhalb der Blasen auf Grund von Diffusion nicht mehr in der durch die Gemischauflösung erzeugten Konzentration vorlagen. Die obere Explosionsgrenze von Schwefelkohlenstoff liegt jedoch bei 60% [5] und aus den Zündversuchen mit fokussiertem Ultraschall ist bekannt, dass sich dieser Dampf auch noch bei Konzentrationen von 2% entzünden lässt (vgl. Abschnitt 4.3). Somit ist es unwahrscheinlich, dass in den eingesprudelten Blasen in keinem Fall zündfähiges Gemisch vorlag. Durch die Versuche mit den genannten Dämpfen zusammen mit denen mit Wasserstoff-Luft und Wasserstoff-Sauerstoff kann somit ausgeschlossen werden, dass es ein leichter entzündliches Gemisch geben könnte.

Durch das Einsprudeln der Brennstoff-Gemisch-Blasen in das Kavitationsfeld war zudem sichergestellt, dass die Kavitationsblasen bestmöglich mit diesen Gemischen in Verbindung gebracht wurden. So zeigt die gelbliche Eintrübung durch die Entstehung von Schwefel in den Versuchen mit Schwefelkohlenstoff, dass die Kavitation mit dem eingeleiteten Gemisch in Wechselwirkung getreten, es aber dennoch nicht zu einer Explosion gekommen ist.

Es könnte angeführt werden, dass die Worst-Case-Bedingungen nur durch Verwendung einer brennbaren Flüssigkeit erzielt werden können. Die Untersuchungen von SYCHEV [76] zeigen aber, dass die Auslösung von Detonationen auch in Wasser-Blasen-Systemen möglich ist. So kann man sich ein solches Zweiphasensystem als ein Medium mit diskret verteilten Quellen chemischer Energie vorstellen [74]. Dies ist unabhängig von der verwendeten Flüssigkeit. Unterstützt werden die Ergebnisse der Zündversuche zudem durch die Untersuchungen von NGUYEN [77] zur Thematik der sog. „cavitation-ignition bubble combustion“. Darunter werden die Zündung und die darauf folgende Verbrennung eines Gasgemisches in einer Brennstoff-Luft-Blase durch adiabatische Kompression verstanden, wie sie bei der hydraulischen Kavitation auftreten können [78]. In den Untersuchungen von NGUYEN [77] wurde in Methanol-Luft- sowie Wasser-Methan-Zweiphasensystemen unter dem Einfluss von akustischer Kavitation untersucht, doch auch hier konnten keine explosionsartigen Zündungen beobachtet werden. Ähnlich wie in den Zündversuchen mit Schwefelkohlenstoff konnte NGUYEN die Entstehung von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid als Verbrennungsprodukte nachweisen.

Vor diesem Hintergrund legen die Ergebnisse nahe, dass die akustische Kavitation nicht als Zündmechanismus wirksam werden kann. Dafür sind mehrere Effekte verantwortlich, die aus der Blasendynamik folgen. So ist für die direkte Zündung von mit explosionsfähigem Gemisch gefüllten Kavitationsblasen ihre Größe zu berücksichtigen. In den Untersuchungen zur Ausbreitung von Blasenzündungen in Zweiphasensystemen nach SYCHEV [74, 76, 79] und MITROPETROS [75, 80] lassen sich am leichtesten Blasen mit Durchmessern von 2 mm bis 5 mm zünden. Unterhalb von 1 mm Durchmesser konnten demzufolge keine Zündungen beobachtet werden [80]. Die Größe der Kavitationsblasen in der expandierten Oszillationsphase liegt jedoch zwischen $30\text{ }\mu\text{m}$ und $150\text{ }\mu\text{m}$ [81], woraus sich Gleichgewichtsradien von $1\text{ }\mu\text{m}$ bis $10\text{ }\mu\text{m}$ abschätzen lassen [69]. Im Moment des Kollaps, wenn die extremen Bedingungen hinsichtlich Druck und Temperatur auftreten, fallen sie auf noch geringere Durchmesser zusammen. Somit liegen sie circa drei Größenordnungen unterhalb der von SYCHEV und MITROPETROS für Zündungen als am günstigsten beschriebenen Blasendurchmessern. Zu berücksichtigen ist zudem, dass die Kavitationsblasen nur für einige hundert Nanosekunden in der Endphase des Kollaps diese extremen Bedingungen aufweisen [82, 83], anschließend auf Grund des stark komprimierten „Gaskissens“ sich jedoch ebenfalls sprunghaft wieder ausdehnen. WARNATZ [84] gibt für Kohlenwasserstoff-Luft-Gemische einer Temperatur von 2000 K Zündverzugszeiten der Größenordnung $10\text{ }\mu\text{s}$ an, sodass die kritische Phase Blasenkollaps zu kurz für eine Entzündung

ist. Darüber hinaus werden sie durch die sie umgebende Flüssigkeit stark gekühlt, wobei in der Literatur Kühlungsraten von bis zu 10^{12} K/s angegeben werden [82]. Somit können die Kavitationsblasen ihre Energie nicht in einem ausreichenden Maße in die in den experimentellen Untersuchungen eingeleiteten Brennstoff-Luft-Blasen einkoppeln, um eine explosionsartige Reaktion zu bewirken.

6 Sicherheitstechnische Anforderungen

Aus den theoretischen Vorüberlegungen und experimentellen Untersuchungen der vorangegangenen Abschnitte konnten Schlussfolgerungen gezogen werden (vgl. Abschnitte 3.4, 4.4, 5.4), sodass sich nun Anforderungen formulieren lassen, mit denen der Einsatz von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären sicher gestaltet werden kann. Diese entwickelten Anforderungen betreffen zum einen Vorschläge für neue Grenzwerte für Ultraschall und zum anderen Maßnahmen, die zur Vermeidung von Zündungen durch den Ultraschall getroffen werden müssen. Außerdem werden Angaben zum messtechnischen Nachweis der Einhaltung der vorgeschlagenen Grenzwerte gegeben.

Die im folgenden aufgelisteten sicherheitstechnischen Anforderungen wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation erarbeitet und mit den Kooperationspartnern im Fachbeirat des Forschungsprojektes diskutiert und als zielführend und anwendbar bestätigt. Sie gliedern sich in drei Teile: einen generell für alle Ultraschallanwendungen gültigen Teil und in jeweils einen Teil für Ultraschall bei direkter Einkopplung in gasförmige Atmosphären und bei Einkopplung in eine Flüssigkeit. Sie wurden in dieser Form bei der 11. Fachtagung für Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit einem breiten Anwenderkreis zur Diskussion gestellt. Die Anforderungen der drei Teile werden jeweils erst dargestellt und direkt folgend erläutert, bevor der nächste Teil dargestellt wird. Die Nummerierung der Anforderungen wird dabei fortgesetzt.

6.1 Generelle Anforderungen

6.1.1 Darstellung der Anforderungen

1. „Ultraschall mit einer Frequenz bis 10 MHz kann unabhängig von der Art der explosionsfähigen Atmosphäre nur indirekt mit Hilfe eines schallabsorbierenden Körpers zündwirksam werden. Die direkt durch die explosionsfähige Atmosphäre absorbierte Ultraschallleistung ist bei solchen Frequenzen nicht zündwirksam.
Ultraschall mit einer Frequenz größer als 10 MHz ist in dieser Untersuchung nicht betrachtet worden. Die bestehenden Einschränkungen im einschlägigen Regelwerk (vgl. DIN EN 1127-1 [1] und TRBS 2152, Teil 3 [2]) sollten daher aufrecht erhalten werden.
2. Leicht entflammbare schallabsorbierende Materialien, z.B. Watte in Luft, sind unabhängig von der Art der explosionsfähigen Atmosphäre in starken Ultraschallfeldern grundsätzlich zu vermeiden, da sie in

Brand geraten können und auf diese Weise zündwirksam werden können“ [85].

6.1.2 Erläuterung

Punkt 1 der grenzt den Gültigkeitsbereich der im weiteren vorgeschlagenen sicherheitstechnischen Anforderungen ein. Als untere Grenzfrequenz für Ultraschall wird dabei, wie in der Literatur üblich [15], 20 kHz angenommen. Oberhalb von 10 MHz könnten Effekte auftreten, die im Rahmen des Forschungsprojektes nicht untersucht wurden, wie z.B. Molekularresonanz. Da hierzu keine Untersuchungen angestellt wurden, können im Rahmen dieses Forschungsprojektes dazu keine Aussagen getroffen werden. In dem betrachteten Frequenzspektrum von 20 kHz bis 10 MHz ist eine Zündung nur durch die Ausbildung einer heißen Oberfläche an einem akustisch absorbierenden Körper im Schallfeld möglich.

Punkt 2 betrifft den Fall, dass sich dieser absorbierende Körper im Schallfeld erwärmt und dabei entflammt. Gerät ein solcher Stoff in Brand, kann es zu einer Zündung an der offenen Flamme kommen. Zu diesen Stoffen gehören in Luft insbesondere Watte oder Baumwolle.

6.2 Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Gasen, Dämpfen und Stäuben

6.2.1 Darstellung der Anforderungen

3. „Ultraschall kann gegenüber explosionsfähigen Atmosphären von Stäuben nicht zündwirksam werden, wenn der Schalldruckpegel im ganzen Schallfeld 170 dB (re. 20 μ Pa) nicht überschreitet, da dann keine kritischen Temperaturen am Absorber erreicht werden können.
In diesem Grenzwert ist ein Sicherheitsabstand von 6 dB enthalten, der einer Halbierung der Schalldruckamplitude entspricht. Dabei ist eine Messunsicherheit von 2 dB ($k=1$) berücksichtigt und ein Absorptionsgrad des Zielkörpers von 100% bei 5 kHz.
4. Kann der Grenzwert nicht eingehalten werden, ist zu verhindern, dass ortsfeste, schallabsorbierende Körper, wie insbesondere faserige Stoffe oder offenporige Schaumstoffe, Beschallungszeiten größer als 1 s ausgesetzt werden.
5. Der Grenzwert von 170 dB (re. 20 μ Pa) kann auch für explosionsfähige Atmosphären von Gasen und Dämpfen angewendet werden, da auch für

diese keine zündwirksamen Temperaturen am Absorber erreicht werden können“ [85].

6.2.2 Erläuterung

Neben den allgemein gültigen sicherheitstechnischen Anforderungen wird in diesem Vorschlag zwischen der Einkopplung in gasförmige Atmosphären und in Flüssigkeiten unterschieden, die getrennt betrachtet werden müssen. Punkt 3 bis Punkt 5 betreffen den ersten dieser beiden Bereiche.

Punkt 3 nennt im Gegensatz zum bisher gültigen Grenzwert von 1 mW/mm^2 einen Schalldruckpegel anstelle einer Intensität als Grenzwert. Der Vorteil ist, dass sich dieser mit Hilfe eines breitbandigen dynamischen Druckaufnehmers direkt messen lässt. Somit entfällt die problematische Bestimmung der Intensität im Luft-Ultraschallfeld, die sich allgemein berechnet als $I = v_{eff} \cdot p_{eff}$, sodass sowohl der Effektivwert der Schallschnelle und des Schalldrucks im Messpunkt gleichzeitig bekannt sein müssten. Zudem sind Schalldruck und Schallschnelle im allgemeinen Fall gegeneinander phasenverschoben, sodass der Phasenwinkel zwischen den Scheitelwerten \hat{p} und \hat{v} bekannt sein müsste. Hinzu kommt, dass dieser Phasenwinkel im Stehwellenfeld 90° beträgt, sodass sich in diesem Fall eine Intensität von 0 ergibt, obwohl die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass genau dies der kritischste Fall ist (vgl. Abschnitt 3.1).

Wird der Grenzwert von 170 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$) überall im Schallfeld unterschritten, kann eine Zündung ausgeschlossen werden, da sich entsprechend der experimentellen Untersuchungen in diesem Fall auch bei Vorhandensein von Absorbern im Schalldruckbauch des Ultraschallstehwellenfeldes keine kritischen Temperaturen über 200°C erzielen lassen. Der Schalldruck darf allerdings an keiner Stelle im Schallfeld 170 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$) überschreiten. Kritische Stellen sind neben Schalldruckbäuchen in Ultraschallstehwellenfeldern der Fokus von konkav geformten Sonotroden oder das Nahfeld einer Ultraschallquelle. Die drei Fälle sind in Abbildung 31 dargestellt. Entsprechend ist für die Beurteilung der Schalldruckpegel an einer Reflektoroberfläche im Abstand von einer Wellenlänge (vgl. Abbildung 10a)), an der Nahfeldgrenze (vgl. Abbildung 10b)) oder im Fokus (vgl. Abbildung 10c)) des Wandlers maßgeblich. Die Nahfeldgrenze lässt sich über $N = (D^2 - \lambda^2)/(4\lambda) \approx D^2/4\lambda$ bestimmen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Dabei ist D der aktive Durchmesser des Schallsenders und λ die Wellenlänge des Ultraschalls im gasförmigen Ausbreitungsmedium. Für die Messung ist ein kalibrierter breitbandiger Messaufnehmer zu verwenden.

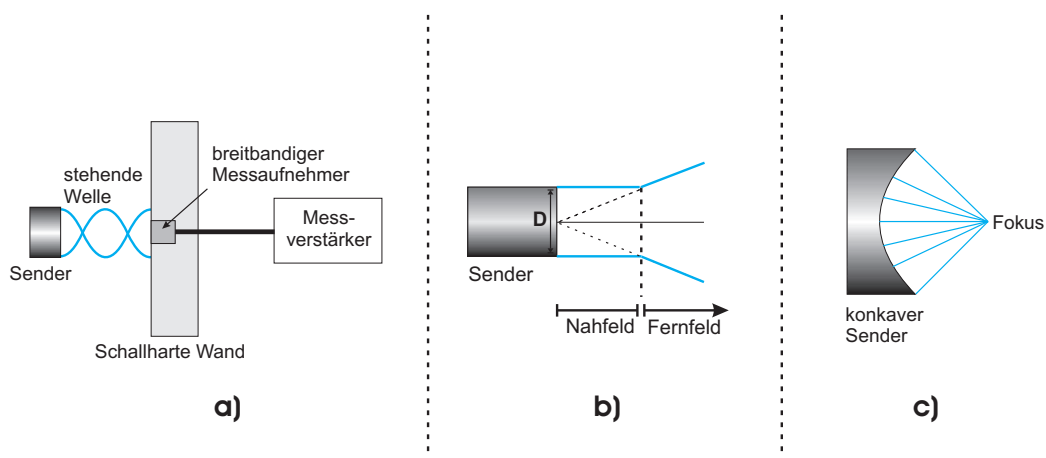


Abbildung 31: Kritische Stellen für die Bestimmung des maximalen Schalldruckpegels: a) Es kann zur Ausbildung einer stehenden Welle kommen. In diesem Fall muss der Schalldruckpegel an einer Reflektoroberfläche im Abstand einer Wellenlänge gemessen werden. b) Bei unfokussiert in den freien Raum abstrahlenden Sendern erfolgt die Messung an der Nahfeldgrenze. c) Bei konkav geformten Sendern ist der Schalldruckpegel im Fokus maßgeblich.

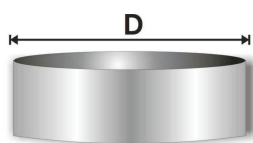
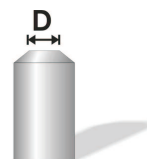
Punkt 4 betrifft den Fall, dass der Grenzwert von 170 dB (re. 20 μPa) überschritten wird. In diesem Fall müssen akustisch absorbierende Stoffe mit Verweildauern länger als 1 s vermieden werden. Dies betrifft insbesondere poröse Stoffe mit offenen Poren wie faserige Stoffe (Wollen) oder Schaumstoffe, da sie Frequenzen im Bereich oberhalb von 5 kHz gut absorbieren und sich somit im Ultraschallfeld stark erwärmen können.

Die Zündungen erfolgten jedoch nur bei Schwefelstaub mit einer Zündtemperatur von 250°C. Entsprechend werden als „kritische Erwärmung“ Temperaturen oberhalb von 200°C verstanden. Für Gase und Dämpfe konnte nur für Schwefelkohlenstoff eine Zündung beobachtet werden. Dafür waren noch höhere Temperaturen im Absorber oberhalb von 400°C erforderlich, die sich erst bei Schalldruckpegeln oberhalb von 180 dB (re. 20 μPa) erzielen ließen. Somit ist der vorgeschlagene Grenzwert auch für Gase und Dämpfe gültig, wie in Punkt 5 festgestellt wird.

6.3 Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche

6.3.1 Darstellung der Anforderungen

6. „Ultraschall kann gegenüber explosionsfähigen Atmosphären oberhalb einer Flüssigkeitsoberfläche nicht zündwirksam werden, wenn die Schallintensität an der Flüssigkeitsoberfläche 400 mW/mm^2 nicht überschreitet, da dann an Schallabsorbern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen, keine kritischen Temperaturen erreicht werden können. Dieser Grenzwert beinhaltet einen Sicherheitsabstand von 20% gegenüber der experimentell ermittelten Zündgrenze für Diethylether und berücksichtigt eine Messunsicherheit von 8% ($k=1$). Der Grenzwert ist repräsentativ für alle Gase und Dämpfe, einschließlich Schwefelkohlenstoff.
7. Das Einhalten des Intensitätsgrenzwertes kann durch das nachfolgend beschriebene Verfahren nachgewiesen werden.
 - a. Für einzelne Ultraschallquellen,
 - deren Durchmesser größer oder gleich der Schallwellenlänge in der Flüssigkeit ist, darf die akustische Ausgangsleistung dieser Quelle bezogen auf das Quadrat der Schallwellenlänge in der Flüssigkeit den Grenzwert nicht überschreiten (Abbildung 32, Fall 1). Es ist hinreichend, wenn die Bedingung für die elektrische Eingangsleistung der Quelle erfüllt ist.
 - deren Durchmesser kleiner als die Schallwellenlänge in der Flüssigkeit ist, darf die akustische Ausgangsleistung dieser Quelle bezogen auf deren abstrahlende Fläche den Grenzwert nicht überschreiten (Abbildung 32, Fall 2).
 - b. Für Anordnungen aus mehreren Ultraschallquellen,
 - bei denen es zu einer additiven Überlagerung der Schallfeldmaxima im Fernfeld der Ultraschallquellen kommen kann, darf auch die Summe der nach a. berechneten Intensitäten der sich überlagernden Quellen den Grenzwert nicht überschreiten (Abbildung 33, Fall 3).
 - bei denen sich die Schallfeldmaxima der einzelnen Quellen im Fernfeld nicht mehr additiv überlagern können (Abbildung 34, Fall 4), ist die Bewertung für die einzelnen Quellen nach a. hinreichend.

Fall 1: Nachweisführung für $D \geq \lambda$ Bedingung: $P / \lambda^2 \leq 400 \text{ mW/mm}^2$ Fall 2: Nachweisführung für $D < \lambda$ Bedingung: $P / A_{\text{eff}} \leq 400 \text{ mW/mm}^2$ **D:** Durchmesser der abstrahlenden Ultraschallquelle **A_{eff} :** abstrahlende Fläche der Ultraschallquelle **λ :** Schallwellenlänge in der Flüssigkeit**P:** akustische Ausgangsleistung

(oder alternativ elektrische Eingangsleistung) der Ultraschallquelle

Abbildung 32: Fallunterscheidung bezüglich der Schallquellenabmessung gegenüber der Wellenlänge

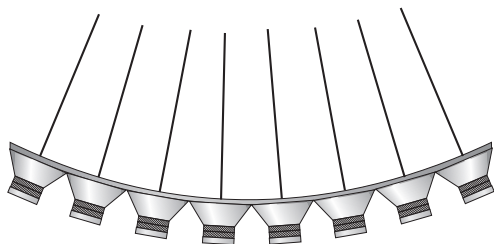


Abbildung 33:

Fall 3: Additive Überlagerung von Quellen

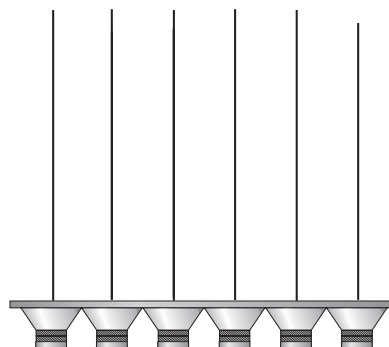


Abbildung 34:

Fall 4: Fehlende Überlagerung im Fernfeld

- c. Überschreiten die nach a. und b. berechneten Intensitäten den genannten Grenzwert, kann das Einhalten des Grenzwertes alternativ durch Bestimmung des Schalldruckmaximums mittels Hydrophonomessung direkt unter der Flüssigkeitsoberfläche nachgewiesen werden:

Die aus dem Schalldruck berechnete Intensität $I(t) = p(t)^2 / (\rho \cdot c)$ darf den Grenzwert nicht überschreiten, dabei bezeichnet ρ die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit des Mediums (vgl. IEC

62127-1 Ed.1.1 [60]).

Im Falle räumlich stark begrenzter Schallbündel (fokussierter Ultraschall), die im Frequenzbereich oberhalb von 500 kHz vorliegen können, darf der Grenzwert auf die räumlich über den Schallbündelquerschnitt (-12 dB-Bündelfläche) gemittelte Intensität I_{sata} (spatial-average time-average intensity, vgl. IEC 62127-1 Ed.1.1 [60]) bezogen werden. Alternativ zur Bestimmung von I_{sata} mittels des Schalldruckprofils ist auch die Messung der akustischen Ausgangsleistung (vgl. IEC 61161 [86]) und Division durch die minimale -12 dB-Bündelfläche möglich.

8. Kann der Grenzwert nicht eingehalten werden, muss eine Zündung durch andere Maßnahmen ausgeschlossen werden. Als Maßnahmen kommen in Betracht:

- Vermeiden von schallabsorbierenden Körpern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen und die eine ähnliche Schallimpedanz wie die Flüssigkeit aufweisen,
- Vermeiden von ortsfesten Absorbern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen,
- Begrenzung der Beschallungszeit von Absorbern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen“ [85].

6.3.2 Erläuterung

Punkt 6 bis Punkt 8 betreffen Anwendungen, bei denen der Ultraschall in eine Flüssigkeit eingekoppelt wird, die Kontakt zu einer explosionsfähigen Atmosphäre hat. In Punkt 6 wird ein Grenzwert von 400 mW/mm² für den Einsatz von Ultraschall in Flüssigkeiten vorgeschlagen, der einer Erhöhung des bisher gültigen Grenzwertes um den Faktor 400 entspricht. Dabei wird gegenüber der experimentell ermittelten Zündgrenze ein Sicherheitsabstand von 20% beaufschlagt, da keine Untersuchungen zur Optimierung des Zielkörpermaterials durchgeführt wurden. Dieser Sicherheitsabstand wird als hinreichend sicher angenommen, da für eine Zündung mehrere Bedingungen gleichzeitig auftreten müssten:

- Erstens muss die Intensität der einfallenden Ultraschallwelle den oben genannten Grenzwert an der Flüssigkeitsoberfläche übersteigen.
- Zweitens muss an der Flüssigkeitsoberfläche ein absorbierender Körper fixiert sein, der akustisch an die Flüssigkeit angepasst ist, einen hohen

akustischen Absorptionsgrad aufweist und hinsichtlich seinen Abmessungen die Ultraschallwelle absorbieren kann (d.h. einige Millimeter dick sein). Außerdem muss der Zielkörper so temperaturbeständig sein, dass er sich auf Temperaturen über der Zündtemperatur des Dampfes an der Flüssigkeitsoberfläche erwärmen lässt. Als Zielkörper kommen dabei z.B. auch aufschwimmende Schmutzstoffe aus einem Reinigungsbad oder Teile des Reinigungsgutes in Frage, die die oben genannten Bedingungen erfüllen. Kritisch sind insbesondere viskoelastische Stoffe, wie Kunststoffe oder Bitumen.

- Hinsichtlich des Brennstoff-Luft Gemisches an der Flüssigkeitsoberfläche wurden in den Versuchen zündwilligste Gemische von Diethylether und Schwefelkohlenstoff verwendet. An der Position des Zielkörpers in realen Anwendungen wird aber die Gemischkonzentration meist weit von der zündwilligsten Konzentration entfernt liegen.

Das gleichzeitige Auftreten dieser Bedingungen wird als so unwahrscheinlich angenommen, dass der Sicherheitsabstand von 20% zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich des Zielkörpermaterials als hinreichend angenommen wird.

In Punkt 7 wird beschrieben, wie sich zum Nachweis der Einhaltung des Grenzwertes die Intensität abschätzen lässt. Zur einfachen Handhabung werden dabei in Punkt 7 a) als Grenzfälle der fokussierende Schallwandler und die Punktschallquelle unterschieden (vgl. Abbildung 32). Für eine scharfe Fokussierung im Sinne von Fall 1 ist nach [15] ein Sender mit einem Durchmesser größer als der Wellenlänge, $D \geq \lambda$, notwendig. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Fokussierbarkeit auf einen Strahldurchmesser im Fokus von einer Wellenlänge begrenzt ist. Entsprechend lässt sich die Fläche im Fokus durch $A_{Fokus} = \lambda^2$ abschätzen und somit die Intensität im Fokus zu P/λ^2 , worin P die akustische Ausgangsleistung des Senders ist. Dabei handelt es sich um eine deutliche Überschätzung der Intensität, sodass der Nachweis zur Einhaltung des Grenzwertes mittels dieser Abschätzung zur sicheren Seite ausfällt.

Für eine Punktschallquelle mit einem Durchmesser $D < \lambda$ im Sinne von Fall 2 wird die maximale Intensität direkt vor der Ultraschallquellenoberfläche erreicht und verringert sich dann wegen der halbkugelförmigen Abstrahlung mit dem Abstand von der Quelle. Entsprechend reicht es aus, die Intensität über die maximale akustische Leistung der Schallquelle bezogen auf die effektive abstrahlende Fläche der Ultraschallquelle P/A_{eff} abzuschätzen. Für beide Fälle gilt, dass es zulässig ist, für die Abschätzung der Intensität die elektrische Eingangsleistung der Quelle zu verwenden, wenn die akustische Ausgangsleistung nicht bekannt ist.

In Punkt 7 b) werden Anwendungen adressiert, in denen in einem Ultraschallbad mehrere Quellen zusammenwirken (vgl. Fall 3 in Abbildung 33 und Fall 4 in Abbildung 34). Fraglich ist dabei, ob durch eine additive Überlagerung der Schallfelder der einzelnen Wandler der Grenzwert von 400 mW/mm^2 überschritten werden kann. So könnte es z.B. durch die Überlagerung der Fokusbereiche von Ultraschallquellen nach Fall 1 zum Übersteigen des Grenzwerts kommen, obwohl die Abschätzung für die einzelnen Wandler den Grenzwert unterschreitet. In Ultraschallreinigungswannen könnte zudem durch Verwendung von mehreren Schwingelementen der Grenzwert überschritten werden. Für die sicherheitstechnische Bewertung ist nach Punkt 7 b) entscheidend, ob sich die Schallfeldmaxima im Fernfeld der Ultraschallquelle überlagern können. Dies ist in Abbildung 33 dargestellt. In diesem Fall erfolgt die Abschätzung der Intensität für die einzelnen sich überlagernden Wandler im ersten Schritt nach Punkt 7 a). Die Summe aller sich überlagernden Wandler muss dann den Grenzwert von 400 mW/mm^2 unterschreiten. Können sich diese Schallfeldmaxima im Fernfeld nicht mehr überlagern, ist es dagegen ausreichend, die Abschätzung hinsichtlich jedes einzelnen Wandlers durchzuführen.

Liegen alle abgeschätzten Intensitäten unterhalb des Grenzwertes, gilt auch das Gesamtsystem aus Wandlern als sicher. In der Praxis zählen dazu zum Beispiel Bodenschallwannen mit planarer Bodenfläche, wie sie in der Reinigungstechnik Anwendung finden. Führt die Abschätzung des Grenzwertes nach 7 a) und 7 b) zu einer Überschreitung des Grenzwertes, kann zudem mittels Hydrophonmessung nach Punkt 7 c) sichergestellt werden, dass der Grenzwert dennoch eingehalten wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Hydrophonmessung direkt unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche durch die Reflexion der Ultraschallwelle an der Phasengrenze flüssig-gasförmig stark beeinflusst werden kann. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang jedoch die direkt von der Quelle einfallende Schallwelle. Für die Hydrophonmessung ist es deshalb sinnvoll, die Messung im Abstand des Flüssigkeitsspiegels von der Ultraschallquelle in der vorgesehenen Anwendung durchzuführen und den Einfluss der Reflexion während der Hydrophonmessung z. B. durch einen höheren Flüssigkeitsspiegel zu verringern. Die Messung muss dabei mit Hilfe eines kalibrierten Hydrophons erfolgen. Alternativ lässt sich die Intensität auch durch eine Kombination aus einer Schallleistungsmessung mittels Schallstrahlungskraftwaage und einer Messung der Breite der Bündelfläche mittels Hydrophon ermitteln (vgl. Abschnitt 4.2.3).

Gemäß Punkt 8 ist eine Überschreitung des Grenzwertes dennoch erlaubt, wenn durch andere Maßnahmen eine Zündung durch den Ultraschall ausgeschlossen werden kann. Da die Zündung nur durch die Absorption der Ultraschallwelle durch einen an der Flüssigkeitsoberfläche fixierten Zielkör-

per erfolgen kann, wie in Abschnitt 4 beschrieben, ist eine Überschreitung des Grenzwertes möglich, wenn solche Stoffe ausgeschlossen werden können, oder Beschallungszeiten von länger als 1 s ausgeschlossen werden können.

7 Bedeutung für die Praxis

Die erzielten Erkenntnisse schließen eine Lücke im Regelwerk zur Zündquellenbewertung, indem erstmals die Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber explosionsfähigen Atmosphären nachgewiesen und auf Grundlage der Erkenntnisse ein Vorschlag für eine Neufassung der einschlägigen Passagen in der DIN EN 1127-1:2011 [1] und der TRBS 2152 Teil 3 [2] erarbeitet werden konnte. Dieser Vorschlag wurde im Fachbeirat des Forschungsprojektes, im Rahmen von Konferenzen zur Sicherheitstechnik und in Fachkreisen diskutiert und als anwendbar anerkannt.

Mittels der Untermauerung dieses Vorschlages zur Neubewertung durch in der Fachwelt diskutierte wissenschaftliche Ergebnisse lässt sich zudem eine hohe Akzeptanz für diesen Vorschlag sicherstellen. So wurden bei der Diskussion der theoretischen und experimentellen Erkenntnisse sowie des Vorschlages für sicherheitstechnische Anforderungen im Fachbeirat und in Fachkreisen die wesentlichen Interessengruppen, d. h. Herstellerfirmen, Prüfstellen und Berufsgenossenschaften, miteinbezogen. Durch die persönliche Mitgliedschaft von Mitgliedern des Fachbeirates in den Ausschüssen der genannten Regelwerke ist eine geeignete Weiterverfolgung der Ziele über die vorliegende Arbeit hinaus gewährleistet. Allerdings können Ergebnisse der vorliegenden Arbeit erst im Rahmen der nächsten Revision der Regelwerke berücksichtigt werden.

Für bestehende Anwendungen von Ultraschall folgt aus dem in dieser Arbeit erzielten Erkenntnisgewinn, dass alle bekannten Ultraschallanwendungen in explosionsfähigen Atmosphären entweder unkritisch sind, oder durch einfache Maßnahmen sicher gestaltet werden können. Häufig sind diese Maßnahmen jedoch aus technischen Gründen ohnehin gegeben. Gleichzeitig können Hemmnisse für innovative Einsatzgebiete von Ultraschall durch eine Neuregelung der gültigen Bestimmungen abgebaut werden. So lassen sich zukünftig Reinigungsanlagen mit brennbaren Flüssigkeiten (Lösemittel) statt Wasser als Reinigungsmittel betreiben. Diese erlauben eine effektivere Reinigung, sodass Wasserreserven geschont werden können. Nach den derzeit gültigen Bestimmungen ist der Einsatz von solchen Reinigungsmitteln meist nur durch Vermeidung von explosionsfähiger Atmosphäre möglich ist. Für Anwendungen in gasförmigen Medien, z.B. der Ultraschall-Füllstandsmessung in Silos, wird der Nachweis der Einhaltung des Grenzwertes, insbesondere durch den Übergang zu einem Schalldruckpegel als Grenzwert, im Hinblick auf die praktische und messtechnische Durchführbarkeit erleichtert.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären. Dabei konnte erstmals die Wirksamkeit der Zündquelle Ultraschall bei direkter Einkopplung in explosionsfähige Atmosphäre und bei Einkopplung in eine an eine solche Atmosphäre angrenzende Flüssigkeit nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnte die Frage beantwortet werden, welche Bedingungen und Parameter für eine solche Zündung erforderlich sind. Dies erfolgte anhand von Worst-Case-Untersuchungen in Kapitel 3 bis Kapitel 5.

Während in Kapitel 2 grundlegende Zusammenhänge zum Explosionsschutz und zur Ausbreitung von Ultraschall dargestellt werden, widmet sich Kapitel 3 der Zündwirksamkeit von Ultraschall bei direkter Einkopplung in eine explosionsfähige Atmosphäre aus Gasen, Dämpfen und fein verteilten Stäuben gemischt mit Luft. Aus theoretischen Vorüberlegungen folgt, dass die direkte Zündung durch Absorption nicht möglich ist. Stattdessen ist ein im Schallfeld befestigter Festkörper erforderlich, der die akustische Energie in Wärme umwandeln kann, sodass es zu einer Zündung an der heißen Oberfläche dieses Absorberkörpers kommt. Als Absorbermaterialien kommen dabei poröse Festkörper mit offenen Poren in Frage, z. B. Schaumstoffe oder Faserkörper (Mineralwollen, Watte), da sie einerseits akustisch gut an die Gasphase angepasst sind und gleichzeitig einen hohen akustischen Absorptionskoeffizienten aufweisen. Die Zündversuche wurden zudem in einem Ultraschallstehwellenfeld durchgeführt, da sich hier die stärksten Erwärmungen erzielen lassen. Die Zündungen erfolgten in Schwefelstaub-Luft-Gemischen bei Schalldruckpegeln über 178 dB und Schwefelkohlenstoff bei Schalldruckpegeln von über 180 dB.

Kapitel 4 betrachtet den Fall, dass der Ultraschall in eine Flüssigkeit eingekoppelt wird, die an eine explosionsfähige Atmosphäre angrenzt. Dabei wird zunächst nur die von der Ultraschallwelle transportierte Energie betrachtet und akustische Kavitation vernachlässigt. Wegen der Reflexion der Schallwelle an der Phasengrenze flüssig-gasförmig ist die direkte Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre nicht möglich. Befindet sich jedoch ein Festkörper an der Flüssigkeitsoberfläche, der akustisch an die Flüssigkeit angepasst ist und der den Ultraschall absorbieren kann, kann es auch hier durch Ausbildung einer heißen Oberfläche zu einer Zündung kommen. Kritisch sind dabei insbesondere viskoelastische Festkörper wie Kunststoffe. Für eine hinreichend starke Erwärmung war fokussierter Ultraschall im MHz-Bereich mit Intensitäten über 500 mW/mm^2 notwendig. Damit konnten sowohl Schwefelkohlenstoff-

als auch Diethylether-Luft-Gemische gezündet werden.

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Zündwirksamkeit von akustischer Kavitation, die durch Ultraschall in Flüssigkeiten angeregt wird und im kHz-Bereich besonders heftig ausfällt. Es zeigte sich, dass akustische Kavitation keinen Zündmechanismus darstellt. Dies konnte durch theoretische Überlegungen und Zündversuche mit den am leichtesten entzündlichen Gas- bzw. Dampf-Luft-Gemischen sowie Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch nachgewiesen werden. Aufbauend auf den in Kapitel 3 bis Kapitel 5 erzielten Worst-Case-Betrachtungen, Ergebnissen und Schlussfolgerungen werden in Kapitel 6 sicherheitstechnische Anforderungen für Ultraschallanwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen dargestellt und erläutert. Diese Anforderungen umfassen einen Grenzwert von 170 dB (re. 20 μ Pa) für Einsatzgebiete in gasförmigen Medien und 400 mW/mm² in Flüssigkeiten. Wie in Kapitel 7 erläutert, runden diese erarbeiteten Anforderungen die Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall ab und bilden einen Vorschlag für die sicherheitstechnische Neubewertung dieser Zündquelle, der in den relevanten Normen und Regelungen der Sicherheitstechnik umgesetzt werden kann. Als Konsequenz erweitert sich, bei gleichem Schutzniveau, die Zahl von Anwendungsmöglichkeiten von Ultraschall in explosionsgefährdeten Bereichen.

Literatur

- [1] DIN EN 1127-1. Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik, 2011.
- [2] Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152 Teil 3. Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre.
- [3] Directive 1994/9/EC of the European Parliament and the council of March 1994 on the approximation of the laws of the Member State concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, 1994.
- [4] C.K. Law. *Combustion Physics*. Cambridge University Press, 2006.
- [5] E. Brandes; W. Möller. *Safety Characteristic Data , Volume 1: Flammable Liquids and Gases*. Wirtschaftsverlag NW, 2 edition, 2008.
- [6] J. Warnatz; U. Maas; R.W. Dibble. *Combustion - Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Springer Verlag, 2006.
- [7] B. Lewis; G. von Elbe. *Combustion, Flames and Explosions of Gases*. Academic Press Inc., 1987.
- [8] H.G. Wagner. Handbuch des Explosionsschutzes, Kapitel 1., Explosionsvorgänge, pp.1–68. Wiley – VCH Verlag, 2004.
- [9] T. Langer. Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen durch repetierende Teilentladungen. *Dissertation*, Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [10] S. Schenk. Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre durch gepulste optische Strahlung. *Dissertation*, Technische Universität Braunschweig, 2001.
- [11] T. Horn. Gefährdungsbetrachtung von PEM-Brennstoffzellen hinsichtlich des Einsatzes in explosionsgefährdeten Betriebsstätten. *Dissertation*, Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [12] DIN EN 60079-28. Explosionsfähige Atmosphäre – Teil 28: Schutz vor Einrichtungen (IEC 60079-28:2006), 2007.

- [13] Directive 1999/9/EC of the European Parliament and the council of December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres, 1999.
- [14] DIN EN 61241-0:2007. Elektrische Betriebsmittel zur Verwendung in Bereichen mit brennbarem Staub - Teil 0: Allgemeine Anforderungen, 2007.
- [15] H. Kuttruff. *Physik und Technik des Ultraschalls*. Hirzel Verlag, 1988.
- [16] D. Ensminger. *Ultrasonics - Fundamentals, Technology, Applications*. Dekker, Inc., 1988.
- [17] J.D.N. Cheeke. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press, 2012.
- [18] H. Kuttruff. *Akustik -Eine Einführung*. Hirtzel Verlag, 2004.
- [19] O.V. Abramov. *High-Intensity Ultrasonics - Theory and Industrial Applications*. Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [20] M. Möser. *Technische Akustik*. Springer Verlag, 2009.
- [21] F. Mechel. *Schallabsorber Band II - Innere Schallfelder - Strukturen*. Hirtzel Verlag, 1995.
- [22] R. Lerch; G. Sessel; D. Wolf. *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag, 2009.
- [23] A.S. Dukhin; P.J. Goetz. *Ultrasound for Characterizing Colloids - Particle Sizing, Zeta Potential, Rheology*. Elsvier, 2002.
- [24] P.S. Epstein; R.R. Carhart. The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water fog in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(3):553–565, 1953.
- [25] A.B. Bhatia. *Ultrasonic Absorption*. Oxford: Clarendon Press, 1996.
- [26] F.A. Lyman. Attenuation of high-intensity sound in a droplet laden gas. *Journal of sound and vibration*, 51:219 –235, 1977.
- [27] J.W. Zink; L.P. Delasso. Attenuation and dispersion of sound by solid particles suspended in a gas. *Journal of the Acoustic Society of America*, 30:765–771, 1958.

- [28] J.R. Allegra; S.A. Hawley. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 52(5B):1545–1564, 1972.
- [29] H.E. Bass; L.C. Sutherland; A.J. Zuckerwar. Atmospheric absorption of sound: Update. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(4):2019–2021, 1990.
- [30] H.E. Bass; L.C. Sutherland; A.J. Zuckerwar; D.T. Blackstock; D.M. Hester. Atmospheric absorption of sound: Further developments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1):680–683, 1995.
- [31] Y. Dain; R.M. Lueptow. Acoustic attenuation in three-component gas mixtures –theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5):1955–1964, 2001.
- [32] S. G. Ejakov. Acoustic attenuation in gas mixtures with nitrogen: experimental data and calculations. *Acoustical Society of America*, 113(4):1871 – 1879, 2003.
- [33] O. Brandt; H. Freund; E. Hiedemann. Schwebstoffe im Schallfeld. *Zeitschrift für Physik*, 104:511–533, 1937.
- [34] F. Mechel. *Schallabsorber Band I: Äußere Schallfelder - Wechselwirkungen*. Hirtzel Verlag, 1989.
- [35] C. N. Wang; J. H. Torng. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials. *Applied Acoustics*, 62:447–459, 2001.
- [36] D. Cuiyun; C. Guang; X. Xinbang; L. Peisheng. Sound absorption characteristics of a high temperature sintering porous ceramic material. *Applied Acoustics*, 2012:865–871, 73.
- [37] R.C. Preston. *Output-measurements for medical ultrasound*. Springer Verlag, 1991.
- [38] K.S. Suslick. *Ultrasound - Its Chemical, Physical, and Biological Effects*. VCH Publishers, Inc., 1988.
- [39] E.G. Lierke. Effekte und Anwendungen von Luft-Ultraschall hoher Schallpegel. Kolloquium der Abteilung 1 und 3, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Juni 2011.

- [40] W.L. Nyborg. Heat generation by ultrasound in a relaxing medium. *Journal of the Acoustic Society of America*, 70(2):310–312, 1981.
- [41] J. A. Gallego-Juárez; G. Rodríguez; V. Acosta; E. Riera. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 17:953–964, 2010.
- [42] M. Steinberg. Untersuchungen zur Temperaturentwicklung in Festkörpern bei der Bestrahlung mit der Zündquelle Ultraschall. *Bachelorarbeit*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Insitut für Apparate- und Umwelttechnik, 2011.
- [43] T. Hemsel; C. Hennig; C. Kauczor; W. Littmann. Powder coating fabrication by ultrasonic standing wave atomizer. *HNI Verlagsschriftenreihe*, 180:183–186, 2005.
- [44] J. Vestweber. Einsatzmöglichkeiten der Ultraschallstehwellenerzeugung in der Lackiertechnik – Vergleich der Tropfengrößenverteilungen mit pneumatischer, hydraulischer und Hochrotationszerstäubung. *Dissertation*, Universität Paderborn, 2004.
- [45] N. Lessmann. Numerical and experimental investigation of the disintegration of polymer melts in an ultrasonic standing wave atomizer. *Dissertation*, Universität Paderborn, 2004.
- [46] L. Zipser; H. Franke. Refracto-vibrometry – a novel method for visualizing sound waves in transparent media. In *Acoustics 08 Paris*, 2008.
- [47] L. Zipser; H. Franke. Laser-scanning vibrometry for ultrasonic transducer development. *Sensors and Actuators A*, 110:264–268, 2004.
- [48] T. Hemsel. Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Universität Paderborn, Fürstenallee 11 33102 Paderborn, Deutschland.
- [49] DIN EN 13821. Explosionsfähige Atmosphären - Explosionsschutz - Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen, 2003.
- [50] P. Below. Untersuchungen zur Zündquelle Ultraschall in Staub-Luft-Gemischen und an der Phasengrenze flüssig-gasförmig. *Masterarbeit*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Insitut für Apparate- und Umwelttechnik, 2012.
- [51] W. Littmann. Piezoelektrische, resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. *Dissertation*, Universität Paderborn, 2003.

- [52] M. Hauptmann; H. Struyf; P. Mertens; M. Heyns; S. De Gendt; C. Glorieux; S. Brems. Towards an understanding and control of cavitation activity in 1 MHz ultrasound fields. *Ultrasonic Sonochemistry*, 20:77–88, 2013.
- [53] V. Deutsch; M. Platte; M. Vogt. *Ultraschallprüfung: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin, 1997.
- [54] M. Beyer; D. Markus. Ignition of explosive atmospheres by small hot particles: Comparison of experiment and simulation. *Science and Technology of Energetic Materials*, 73:1–7, 2012.
- [55] M. M. Welzel; S. Schenk; M. Hau; H. K. Cammenga; H. Bothe. Ignition of combustible/air mixtures by small radiatively heated surfaces. *Journal of Hazardous Materials*, 72:1–9, 2000.
- [56] W. P. Mason. *Physical Acoustics V14: Principles and Methods*, volume 14. Elsevier, 1979.
- [57] L. Meyer. Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Phasengrenze flüssig-gasförmig. *Masterarbeit*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik, 2012.
- [58] R. Grabski; M. Koch. *Praxis der Infrarot-Thermografie im Feuerwehreinsatz: Naturwissenschaftliche Grundlagen für den Einsatz von Wärmebildkameras*. Fachverlag Matthias Grimm, 2008.
- [59] H. Budzier; G. Gerlach. *Thermal Infrared Sensors: Theory, Optimisation and Practice*. John Wiley & Sons, 2010.
- [60] IEC 62127-1. Ultrasonics– Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz. Geneva: International Electrotechnical Commission Publication 62127-1, 2007.
- [61] M.M. Welzel. Entzündung von explosionsfähigen Dampf/Luft- und Gas/Luft-Gemischen durch kontinuierliche optische Strahlung. *Dissertation*, Technische Universität Braunschweig, 1996.
- [62] R.S. Lakes. *Viscoelastic Materials*. Cambridge University Press, 2009.
- [63] N.M. Laurendeau. Thermal ignition of methane-air mixtures by hot surfaces: A critical examination. *Combustion and Flame*, 46:29–49, 1982.

- [64] J.W. Mullen; J.B. Fenn; M.R. Irby. The ignition of high velocity streams of combustible gases by heated cylindrical rods. In *Third Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena*, pages 317–329, 1949.
- [65] L.H. Simon, V. Wilkens, and M. Beyer. Ultrasonically triggered ignition at liquid surfaces. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22:235 – 242, 2015.
- [66] R.E. Apfel. *Ultrasonics*, chapter Acoustic Cavitation, pages 355–407. Academic Press, 1981.
- [67] E.B. Flint; K.S. Suslick. Sonoluminescence from nonaqueous liquids: Emission from small molecules. *Journal of the American Chemical Society*, 111:6987–6992, 1989.
- [68] J. Lifka; B. Ondruschka; J. Hofmann. Einsatz von Ultraschall zum Schadstoffabbau in Wasser: Aquasonolyse – Eine Übersicht. *Chemie Ingenieur Technik*, 74:403–413, 2002.
- [69] U. Parlitz; R. Mettin; S. Luther; I. Akhatov; M. Voss; W. Lauterborn. Spatio-temporal dynamics of acoustic cavitation bubble clouds. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A.*, 357:313–330, 1999.
- [70] S. Luther; R. Mettin; W. Lauterborn. Dynamik akustischer Blasenfelder. In *Fortschritte der Akustik – DAGA 2000*, 2000.
- [71] R. Mettin. *Bubble and particle dynamics in acoustic fields: Modern trends and applications*, chapter Bubble structures in acoustic cavitation, pages 1–36. Research Signpost, Kerala, India, 2005.
- [72] T. Nowak; R. Mettin; W. Lauterborn. *Bubble motion and jetting at sonotrodes*, pages 712–714. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), 2009.
- [73] R. Hankers. Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall bei einer Frequenz von 20 kHz in kavitierenden Flüssigkeiten. *Bachelorarbeit*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, 2013.
- [74] A. I. Sychev. The effect of bubble size on the detonation wave characteristics. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 31:577 – 584, 1995.
- [75] K. Mitropetros; H. Hieronymus; J. Steinbach. Single bubble ignition after shock wave impact. *Chemical Engineering Science*, 61:397–416, 2006.

- [76] A. I. Sychev; A.V. Pinaev. Self-sustaining detonation in liquids with bubbles of explosive gas. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 27(1):119123, 1986.
- [77] Q. V. Nguyen; D. A. Jacqmin. A study of cavitation-ignition bubble combustion. Technical report, NASA Glenn Research Center, 2005.
- [78] H.J. Lohrenz. Die Entwicklung extrem hoher Temperaturen in Hydrauliksystemen und die Einflüsse dieser Temperaturen auf die Bauteile und ihre Funktionen . In *Mineralöltechnik*, volume 11. Mineralöl Zentralverband e.V., 1968.
- [79] A. I. Sychev. Bubble detonation in polydisperse media. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 33:339–343, 1997.
- [80] K. Mitropetros. Shock induced bubble explosions in liquid cyclohexane. *Dissertation*, Technischen Universität Berlin, 2005.
- [81] A. Billo. *Holographische Partikelfeldanalyse am Beispiel akustischer Lichtenberg-Figuren*. PhD thesis, TU Darmstadt, 1997.
- [82] K.S. Suslick; D.J. Flannigan. Inside a collapsing bubble: Sonoluminescence and the conditions during cavitation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 59:659–683, 2008.
- [83] W. Lauterborn; T. Kurz; R. Mettin; P. Koch; D. Kröninger; D. Schanz. Acoustic cavitation and bubble dynamics. *Archives of Acoustics*, 33(4):609–617, 2008.
- [84] J. Warnatz. Resolution of gas phase and surface chemistry into elementary reactions. *Proceedings of the Combustion Institute*, 24:533, 1993.
- [85] L.H. Simon; V. Wilkens; M. Beyer. Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären. In *11. Fachtagung für Anlagen-, Arbeits- und Umweltsicherheit*, Köthen, November 2013. Verband Deutscher Ingenieure (VDI).
- [86] IEC 61161 Ed.3. Ultrasonics – power measurement – radiation force balances and performance requirements.

A Sicherheitstechnische Kenngrößen

A.1 Zündtemperatur

A.1.1 Definition

„Die Zündtemperatur ist die niedrigste Temperatur (einer heißen Oberfläche), bestimmt nach vorgeschriebenem Verfahren, bei der sich ein entzündliches Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemisch gerade noch entzündet“ [5].

A.1.2 Sauerstoffanteil im explosionsfähigen Gemisch

„Es gibt keine einheitliche Abhängigkeit der Zündtemperatur vom Sauerstoffanteil. Für viele entzündbare Stoffe erniedrigt sich die Zündtemperatur mit zunehmendem Sauerstoffanteil. Die Erniedrigung kann bis zu 300 K betragen“ [5].

A.1.3 Temperaturklassen

„Entzündbare Gase und Dämpfe werden nach ihrer Zündtemperatur in Temperaturklassen eingeteilt. Temperaturklassen sind Zündtemperaturbereiche, die ein abgestuftes Gefahrenpotential hinsichtlich der Zündung durch heiße Oberflächen widerspiegeln. Sie legen damit auch höchstzulässige Oberflächentemperaturen für elektrische und nichtelektrische Betriebsmittel im Bezug auf den verwendeten entzündbaren Stoff fest“ [5].

Tabelle 2: Temperaturklassen und maximal zulässige Oberflächentemperatur

Temperaturklasse	Zündtemperatur /°C	maximal zulässige Oberflächentemperatur /°C
T1	T	450
T2	$300 < T$	300
T3	$200 < T$	200
T4	$135 < T$	135
T5	$100 < T$	100
T6	$85 < T$	85

A.2 Mindestzündenergie

„Die Mindestzündenergie ist der Mindestwert der im Entladekreis gespeicherten Energie, die bei Entladung über eine Funkenstrecke mit möglichst geringen Verlusten in den Zuleitungen das Brennstoff/Luft-Gemisch bei jeder zündfähigen Zusammensetzung gerade noch entzündet. [...]

Die Mindestzündenergie sinkt mit steigendem Druck etwa umgekehrt proportional dem Quadrat des Anfangsdruckes. [...]

Die Mindestzündenergie sinkt mit steigender Temperatur [...] Mit zunehmendem Sauerstoffanteil nimmt die Mindestzündenergie exponentiell ab“ [5].

A.3 Normspaltweite bzw. flammendurchschlagssichere Spaltweite

A.3.1 Definition

„Die flammendurchschlagssichere Spaltweite ist der nach genormten Verfahren bestimmte Abstand eines Ringspaltes (definierte Länge 25 mm), der bei jeder Konzentration des explosionsfähigen Brennstoff/Luft-Gemisches den Durchtritt einer Flamme gerade noch verhindert“ [5].

A.3.2 Explosionsgruppen

Entzündbare Gase und Dämpfe werden nach ihrer flammendurchschlagsicheren Spaltweite in Explosionsgruppen eingeteilt. Explosionsgruppen sind Bereiche flammendurchschlagsicherer Spaltweiten, die ein abgestuftes Gefahrenpotential hinsichtlich des flammendurchschlagvermögens der entzündbaren Gase und Dämpfe widerspiegeln“ [5].

Tabelle 3: Explosionsgruppen geordnet nach flammendurchschlagsicherer Spaltweite

Explosionsgruppe	flammendurchschlagsichere Spaltweite (SW) /mm
IIA	$SW > 0,9$
IIB	$0,5 < SW \leq 0,9$
IIC	$SW \leq 0,5$

A.4 Untere Explosionsgrenze und obere Explosionsgrenze

„Die untere und die obere Explosionsgrenze begrenzen den Bereich explosionsfähiger Gemische aus entzündbarem Stoff und Luft. Die Explosionsgrenzen selbst sind nicht Teil des Explosionsbereichs [...] An der unteren Explosionsgrenze liegt das Oxydationsmittel im Überschuss vor ander der oberen der entzündbare Stoff“ [5].

B Gerätekategorien und Zoneneinteilung

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Gerätekategorien und Zonen

Gerätekategorie	Vermeidung wirksamer Zündquellen	Maß an Sicherheit	Vorhandensein explosionsfähiger Atmosphäre
3	normal	Zone 2 (Zone 22)	selten und kurzzeitig
2	hoch	Zone 1 (Zone 21)	gelegentlich
1	sehr hoch	Zone 0 (Zone 20)	langzeitig, ständig oder häufig

C Liste der Kooperationspartner des Forschungsprojektes

1. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
2. Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
3. Berufsgenossenschaft Holz und Metall
4. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie
5. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin mbH
6. BANDELIN electronic GmbH & Co. KG
7. Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG
8. Georg Render GmbH
9. Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG
10. TELSONIC AG
11. Weber Ultrasonics GmbH

D Verwendete Stäube

Tabelle 5: Kennzahlen zu den untersuchten Stäuben

Stoff	Staubzustand							Kenngrößen aufgewirbelten Staubes						
	Korngrößenverteilung μm						Median	Feuchte	UEG	max. Explosions- druck	Staubex- plosions- klasse/ -fähigkeit	MZE	Zünd- temperatur	Brenn- verhalten
	< 500	< 250	< 125	< 63	< 32	< 20								
	Gew. %						μm	Gew. %	g/m ³	bar		mJ	°C	BZ
Schwefel		100	99	89	52		30	0,3	60	5,5	St1	> 1 / < 3	250	5
Calciumstearat				100	94	92	< 10	0,6	30	8	St1	> 3 / < 10	400	3
Maisstärke			100	99	92	79	10	8,6	125	8,3	St1	> 30 / < 100	380	3
Magnesium			100	37	1		70	0,1	20	7,2	St1		600	4
Aluminium	100	99	95	77			17	0,5	60	10,4	St3		590	4

E Publikationsliste

Konferenzartikel/-poster

- L.H. Simon, T. Langer, F. Lienesch; Untersuchung von zündfähigen Teilentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung bis 1 MHz, Vortrag und Konferenzbandartikel, 12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik; Berlin, 2010
- T. Langer, L.H. Simon, F. Lienesch, M. Paul, D. Markus, U. Maas; Experimentelle und numerische Untersuchung von Zündprozessen in Folge von elektrischen Entladungen, Vortrag und Konferenzbandartikel, 12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik; Berlin, 2010
- L.H. Simon, M. Beyer, V. Wilkens, T. Fedtke; Dust explosions triggered by ultrasound standing wave fields; Poster, 9th International Workshop on Piezoelectric Applications and Transducers; Hiroasaki, Japan, 2012
- L.H. Simon, V. Wilkens, T. Fedtke, M. Beyer; Ignition of dust-air atmospheres by ultrasonic waves; Vortrag und Konferenzbandartikel, 9th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions; Krakau, Polen, 2012
- L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, M. Beyer; Untersuchungen zur Zündquelle Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären; Vortrag, Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag; Magdeburg, 2013 (ISBN: 978-3-00-041601-9)
- L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, M. Beyer; Incendivity of Ultrasound Applied in Explosive Atmospheres; Vortrag und Konferenzbandartikel, 24th International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems; Taipei, Taiwan, 2013
- L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, M. Beyer; Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen zum Einsatz von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären; Vortrag und Konferenzbandartikel, 11. Fachtagung Arbeits-, Anlagen- und Umweltsicherheit; Köthen, 2013
- L.H. Simon, M. Beyer, T. Fedtke, V. Wilkens, Ultraschall als Zündquelle in explosionsfähigen Atmosphären, Vortrag, DAGA 2014, 40. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, 2014

- L.H. Simon, V. Wilkens, M. Beyer; Safety related conclusions for the application of ultrasound in explosive atmospheres; Vortrag und Konferenzbandartikel, 10th International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions; Bergen, Norwegen, Juni 2014

Zeitschriftenartikel

- L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, M. Beyer; Ignition of dust-air atmospheres by ultrasonic waves; Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26, 2013, pp. 1583-1589 (DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.009)
- L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, M. Beyer; Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären; PTB-Mitteilungen, 123(3) 2013, pp. 31-42(DOI: 10.7795/210.20130801H)
- L.H. Simon, T. Fedtke, M. Beyer, V. Wilkens; Ultrasonically triggered ignitions at liquid surfaces; Ultrasonics Sonochemistry, 22, 2015, pp. 235-242 (DOI:10.1016/j.ultsonch.2014.06.009).
- L.H. Simon, V. Wilkens, M. Beyer; Safety-related conclusions for the application of ultrasound in explosive atmospheres; Journal of Loss Prevention in the Process Industries, eingereicht 09/2014 .

Vorträge ohne schriftliche Veröffentlichung

- Entzündungen von Staub-Luft- und Dampf-Luft-Atmosphären durch Ultraschall; 16. Sitzung des Facharbeitskreises Explosionsschutz der BG ETEM, Braunschweig, 22.05.2012
- Zündwirksamkeit von Ultraschall in Staubatmosphären, 15. Erfahrungsaustausch der BG HM, Fachbereich Holz und Metall; Hannover, 22.04.2013
- Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären; Technische Jahreskonferenz der chemischen Industrie, 08.05.2013, Leipzig
- Zündwirksamkeit von Ultraschall in Staubatmosphären, 60. Sitzung des Arbeitskreises „Brennbare Stäube“, 12.06.2013 bei der BG RCI in Heidelberg

F Lebenslauf

Persönliche Daten

Name, Vorname:	Simon, Lars Hendrik
Geburtsdatum, -ort:	11.07.1981., Helmstedt
Staatsangehörigkeit:	Deutschland

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

12/2009-heute:	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Fachbereich:	Grundlagen des Explosionsschutzes

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens

10/2002-11/2009	Technische Universität Braunschweig
Fachrichtung	Elektrotechnik
Diplomarbeit:	Quantifizierung von Teilentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung bis 1 MHz

Zivildienst

10/2001-06/2002	Lebenshilfe Helmstedt-Wolfenbüttel
-----------------	------------------------------------

Schulbildung

08/1994-06/2002	Gymnasium Julianum Helmstedt
	Abitur

Auslandsaufenthalte

06/1998-07/1999	High School Aufenthalt, USA
09/2007-12/2007	Auslandsaufenthalt, Grenoble

Ehrenamtliches Engagement

06/2010- heute	Ingenieure ohne Grenzen, Regionalgruppe Braunschweig
----------------	---

Danksagung

Hiermit möchte ich allen danken, die meine Arbeit in irgendeiner Weise unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank

Prof. Dr. rer. nat. Meinhard Schilling für die engagierte Betreuung der Arbeit,

Dr.-Ing. Michael Beyer für die fachliche Unterstützung und Förderung, die konstruktive Kritik und immer offene Ohren,

Dr.-Ing. Volker Wilkens für die fachliche Unterstützung und konstruktive Kritik in Fragestellungen des Ultraschalls und die hervorragende fachbereichsübergreifende Kooperation,

Dr.-Ing. Thomas Fedtke für die fachliche Unterstützung in Fragestellungen zur akustischen Wellenausbreitung in Luft,

Dr.-Ing. Tobias Hemsel für die Bereitstellung der Anlage zur Ultraschallstehwellenerzeugung, sowie für die Beratung und Hilfestellung zu dieser Anlage,

Michael Hau für die herausragende Unterstützung bei der Erstellung von Versuchsanlagen, deren Betreuung und für Diskussionen zur praktischen Umsetzung theoretisch entwickelter Modelle, sowie seine hochpräzise Arbeitsweise,

der **Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, der Berufsgenossenschaft Holz und Metall, der Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin mbH und den Unternehmen BANDELIN electronic GmbH & Co. KG, Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Georg Render GmbH, TELSONIC AG und Weber Ultrasonics GmbH und ihren Vertretern im Fachbeirat** des Forschungsprojektes für die finanzielle und materielle Unterstützung des Projektes sowie für das entgegengebrachte Interesse an den Ergebnissen und die lebhaften Diskussionen,

meinem Studenten und Bürokollegen **Lennart Meyer** für die Ergebnisse und Diskussionen im Rahmen seiner Masterarbeit sowie die freundschaftliche Zusammenarbeit danach,

meinen Studenten **Matthias Steinberg**, **Philip Below**, **Robert Hankers** für ihre Beiträge im Rahmen von Master- und Bachelorarbeiten,

meinem Werkstudenten **Martin Musiot** und der Physiklaborantin **Jenny Gieke**, für die ausdauernde Erzeugung von Messdaten,

meinen Freunden **Susanne** und **Moriz Wille**, **Henner Flohr** sowie meinem Bruder **Jan-Ole** für die Prüfung der Arbeit auf Rechtschreibung und Ausdruck sowie die mentale Rückendeckung,

meinen Freunden und Bürokollegen **Tim Langer** und **Felix Welzel** für ein positives Arbeitsklima, Ratschläge zur Promovieren und Spaß in der Freizeit,

den **Mitgliedern des Fachbeirates des Forschungsprojektes** für die finanzielle und materielle Unterstützung des Projektes sowie das entgegengebrachte Interesse an den Ergebnissen und für die lebhaften Diskussionen,

der **Arbeitsgruppe „Physikalische Zündvorgänge“** für eine schöne Zeit in der PTB, offene Augen, Ohren und Humor im Alltag,

Mark Dräger für die Unterstützung bei der Urlaubsgestaltung als Gegengewicht zur Arbeit,

meinen Eltern **Christa** und **Dieter** für die großherzige Unterstützung, den Rückhalt in allen Lebenslagen und ihre Geduld auf dem Weg hierher.